



Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hybride des enveloppes hygrosopiques

Dalel Medjelekh

► To cite this version:

Dalel Medjelekh. Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hybride des enveloppes hygrosopiques. Matériaux. Université de Limoges; Université Mentouri (Constantine, Algérie), 2015. Français. NNT : 2015LIMO0112 . tel-01286901

HAL Id: tel-01286901

<https://theses.hal.science/tel-01286901>

Submitted on 11 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE DE LIMOGES
ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET INGENIERIE
EN MATERIAUX MECANIQUE ENERGETIQUE ET AERONAUTIQUE
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES
Groupe d'Etude des Matériaux Hétérogènes

UNIVERSITE DE CONSTANTINE 3

ECOLE D'ARCHITECTURE
Laboratoire d'Architecture Bioclimatique et d'Environnement

Thèse N° [-----]

Thèse
pour obtenir le grade de
DOCTEUR DES UNIVERSITÉS DE LIMOGES / CONSTANTINE
Spécialité : Génie civil /Architecture Bioclimatique

présentée et soutenue par

Dalel MEDJELEKH

le 27 novembre 2015

**Caractérisation multi-échelle du comportement thermo hydrique des
enveloppes hygroscopiques**

Thèse dirigée par Frédéric DUBOIS - Laurent ULMET et Saliha ABDOU

JURY

| | | |
|--------------------------------|---|------------|
| M. Rachid BENNACER M. | Professeur des universités, Cachan | Président |
| M. Arnaud EVRARD | Chercheur qualifié, Louvain | Rapporteur |
| M. Laurent ULMET | Maître de Conférences, Egletons | Examineur |
| M ^{me} . Saliha ABDOU | Professeur des universités, Constantine | Examineur |
| M. A. Karim AIT-MOKHTAR | Professeur des universités, La Rochelle | Invité |
| M. Frédéric DUBOIS | Professeur des universités, Limoges | Invité |

Remerciements

Mes remerciements vont tout d'abord l'Université de Limoges, l'école doctorale et le laboratoire GEMH d'Egletons, ensuite au Ministère Algérien de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique pour la bourse dont j'ai bénéficié.

Mon vif remerciement et toute ma gratitude au Professeur Rachid BENNACER pour avoir aimablement accepté de rapporter et présider mon jury de thèse. Je le remercie surtout pour ses encouragements durant ces années, ses appuis (de m'avoir prêté les capteurs,...).

Je remercie Monsieur Arnaud EVRARD qui m'a fait l'honneur d'accepter de rapporter ce travail et de faire partie du jury ;

J'exprime ma reconnaissance au Professeur A. Karim AIT-MOKHTAR qui m'a également fait l'honneur d'accepter mon invitation. Je le remercie d'avoir consacré de son temps et de m'accueillir à son bureau.

Je tiens à remercier vivement mon directeur de thèse le Professeur Frédéric DUBOIS, d'abord de m'avoir fait confiance et d'avoir accepté d'encadrer une architecte de formation sur une telle thématique. Je le remercie également pour ses nombreux conseils et ses critiques constructives pour l'élaboration de ce travail.

Egalement je remercie infiniment mon co-directeur de thèse Monsieur Laurent ULMET pour son suivi, son temps consacré pour le perfectionnement du modèle sur Cast3M, pour toute aide sur les difficultés rencontrées, fichiers météo de TRNSYS,...et pour l'enrichissement scientifique en thermique et hydrique du bâtiment.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Mme le Professeur Saliha ABDOU de m'avoir facilité les formalités administratives du côté de l'Algérie pour le montage de la cotutelle et pour ses encouragements.

Je remercie beaucoup Monsieur Benoît NAIT-ALI de m'avoir accueilli au GEMH de Limoges et m'assisté dans les manipulations de mesure de la conductivité et la chaleur spécifique.

Le grand merci à Monsieur Werner KEILHOZ du CSTB software pour son attention, ses réponses à mes questions concernant le logiciel TRNSYS.

Je remercie également Monsieur le Professeur Michael A HUMPHREYS de l'école d'Architecture de Oxford Brookes University pour ses réponses à mes questionnements multiples sur le confort thermique.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Hamidou le Mac Gyver du labo pour le montage des manip.

Je remercie profondément la famille GUETTOUCHE de la maison en terre d'Ouled Ammar et la famille REZGUI de la maison plaques de plâtre de Séraïdi, de m'avoir accueilli chez eux et d'avoir accepté que je fasse le monitoring de 15 mois.

Pareillement je remercie beaucoup Monsieur Christian FANGIN pour les mesures recueillies auprès de la maison Ossature Bois à Ussanges ;

Je remercie aussi M. Oumedour de la station météorologique de Guelma et M. Chorfa de la station Radar de Séraïdi pour les données météo recueillies ;

Ma reconnaissance à Imane pour le déblocage des bugs sur TRNSYS, Tahar et Mamia de m'avoir accompagné à mes déplacements à Ouled Ammar et Séraïdi ;

Je remercie M. Octavian POP de m'avoir effectué, dans des conditions de temps glacial, les prises des photos par la caméra infrarouge. Je n'oublierai pas sa gentillesse et ses disponibilités envers tous les doctorants.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues au laboratoire GEMH d'Egletons pour l'ambiance créée, les encouragements et toute disponibilité : à Ebrahimovich le gentleman, à Z-Amine le président à Abdel Mounaim le ministre, à Rahmoucha l'émotive, à Lamyaa la douce, à la star Kim Anderson, à Fateh le docteur élégant et à la belle Ema.

Je remercie Haroune pour ses compliments, Nadia et Mouna pour leurs encouragements et Ouarda et Chahrazed pour leur visite à Egletons, bon courage à elles aussi.

Plus intimement, je remercie mon amie et sœur Habiba pour ses aides administratives concernant mon poste au département d'architecture à Annaba, et surtout pour ses encouragements.

Mes remerciements vont à ma famille en France : à Tata Chamia et mon Oncle Nordine pour leurs aides et encouragements. A ma famille en Algérie pour le soutien moral : à mes sœurs et frères, Robila et Fatima, Miloud et Salim, à mes adorables nièces Hidaya et Takwa ;

Enfin mes premières et dernières reconnaissances vont à ma mère, ma chérie, que dieu me garde cette précieuse femme, qui n'a jamais cessé d'être avec moi, à tout moment, même que je sois loin d'elle, par son cœur, ses pensées et ses prières ;

Mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour l'accomplissement de ce travail.

Dalel

Je dédie cette thèse à la mémoire de papa,

Au père affectueux, à l'artiste peintre, au perfectionniste, au francophone qui m'a fait aimer la langue française, à celui à qui je dois tout le respect et la fierté, qui était toujours derrière mes pas, depuis le premier jour de l'école jusqu'à cette thèse.

Je n'aurais jamais cru que tu ne serais pas là papa à peu de temps de la soutenance, tu as laissé un grand vide intérieur qui ne sera, à jamais, comblé. Je te dis comme le dit le prophète Mohammed (Paix et salut sur lui) ou comme est parvenu dans le sens de son hadith :

« Celui qui facilite le chemin de la science, le bon dieu lui facilite le chemin du paradis »

Que Allah te facilite le chemin du paradis papa.

Résumé

Face à la problématique énergétique du bâtiment et l'impact environnemental lié, il apparaît que les enveloppes hygroscopiques sont une piste prometteuse en termes d'amélioration du confort thermique, de qualité de l'air intérieur, de consommation énergétique et de régulation de l'humidité intérieure. Aujourd'hui, on manque de valeurs de référence du comportement hygrothermique transitoire de ce type d'enveloppes. La physique des transferts hydriques dans les matériaux hygroscopiques, aptes à fixer l'humidité, est complexe et rend difficile la modélisation des transferts couplés de chaleur et de masse. Une approche expérimentale et numérique du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques a donc été menée avec une caractérisation multi-échelle. Ainsi, le monitoring de quatre maisons habitées a été sujet de caractérisation au niveau de la première échelle. L'étude à l'échelle du matériau a permis de caractériser les propriétés liées aux transferts de chaleur et de masse. Le couplage thermo-hydrique a fait l'objet d'une étude spécifique à l'échelle de la paroi. Les implémentations différences finies et éléments finis ont abouti à une analyse fine des transferts à l'échelle de cellules-test avec un travail de réduction d'ordre nécessaire pour limiter les temps de calcul. L'accent est mis sur les effets de l'humidité apportés dans les ambiances intérieures afin de valider un outil numérique développé dans ce travail. Les enveloppes hygroscopiques choisies sont composées de matériaux biosourcés tels que le bois massif, le béton de bois, la terre et paille. Les enveloppes de travertin et de plaques de plâtre sont également étudiées.

Mots-clés : Enveloppe hygroscopique, transferts de chaleur et de masse, monitoring, matériaux biosourcés, expérimentations, modèles, simulations numériques.

Abstract

In front of the building energy issues and environmental impact bound, it appears that the hygroscopic envelopes are a promising track in terms of improving of the thermal comfort, indoor air quality, energy consumption and indoor humidity regulation. Today, we lack reference values of the transient hygrothermal behavior of this envelope type. The physics of moisture transfer in hygroscopic materials (capable to fixing moisture) is complex and makes it difficult modeling of coupled heat and mass transfers. Experimental and numerical approaches of hygrothermal behavior in hygroscopic envelopes was therefore conducted with a multi-scale visions. Thus, monitoring of four habited houses was the characterization focus at the first scale. The study on the material scale allowed to characterize the properties related to the heat and mass transfer. The hygrothermal coupling has been the subject of a specific study at a wall scale. Finite differences and finite elements implementations have resulted in a detailed analysis of transfers across cell-test with a reduction work of order required to limit the calculation time.

Emphasis is placed on the effects of moisture brought in indoor environments in order to validate a digital tool developed in this work. The selected hygroscopic envelopes are composed of biosourced materials such as massive wood, wood concrete, earth and straw. Envelopes of travertine and plasterboard are also studied.

Key words : Hygroscopic envelopes, heat and mass transfers, monitoring, biosourced materials, experimentations, models, numerical simulations.

Table des matières

| | |
|-----------------------------------|----------|
| Remerciements..... | v |
| Résumé..... | viii |
| Abstract..... | ix |
| Nomenclature..... | xxvi |
| Introduction générale..... | 1 |

Chapitre I : Synthèse bibliographique sur le comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 6 |
| 1. La filière et la construction bois en France et en Algérie..... | 7 |
| 2. La construction en matériaux hygroscopiques en Algérie | 9 |
| 2-1. Le devenir de l'architecture en terre en Algérie..... | 10 |
| 2-2. Les matériaux plâtre, chaux..... | 10 |
| 2-3. La pierre..... | 11 |
| 3. Comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques | 11 |
| 3-1. Caractérisation thermo hydrique des enveloppes à base de matériaux biosourcés | 12 |
| 3-1-1. Enveloppes en bois massif | 12 |
| 3-1-1-1. Etudes à l'échelle du matériau | 12 |
| 3-1-1-2. Etudes à l'échelle du composant..... | 13 |
| 3-1-1-3. Etudes à l'échelle du bâtiment | 13 |
| 3-1-2. Enveloppes à ossature bois | 14 |
| 3-1-2-1. Etude à l'échelle du composant : système enveloppe | 14 |
| 3-1-2-2. Etude à l'échelle du bâtiment | 14 |
| 3-1-3. Enveloppes bois en parois multicouches | 15 |
| 3-1-3-1. Etude à l'échelle du composant : système paroi | 15 |
| 3-1-3-2. Etude à l'échelle du composant : système enveloppe | 15 |
| 3-1-4. L'utilisation de troncs de palmier | 15 |
| 3-1-5. Comportement thermo hydrique des bétons végétaux | 16 |
| 3-1-6. Enveloppes en paille | 19 |

| | |
|--|----|
| 3-1-6-1. Etudes à l'échelle du composant (Système de mur) | 19 |
| 3-1-6-2. Etude à l'échelle du bâtiment | 19 |
| 3-2. Comportement thermo hydrique des enveloppes en terre | 20 |
| 3-3. Caractérisation thermo hydrique du matériau plâtre et ses dérivés | 22 |
| 3-4. Comportement thermo hydrique des enveloppes en pierre | 23 |
| 4. Etudes portant sur les effets de l'humidité dans les bâtiments | 23 |
| 4-1. Effet sur le confort des occupants et la durabilité des bâtiments | 23 |
| 4-2. Effets sur les consommations énergétiques | 24 |
| 4-3. Conclusion sur le rôle de l'enveloppe hygroscopique | 25 |
| 5. Physique des transferts hygrothermiques dans les matériaux hygroscopiques | 26 |
| 5-1. Comportement hygroscopique | 26 |
| 5-1-1. Isothermes de sorption | 26 |
| 5-1-2. Modèles d'isothermes | 28 |
| 5-1-3. Hystérésis et isothermes partielles | 28 |
| 5-2. Mécanismes de transfert d'humidité | 29 |
| 5-3. Changement d'état de l'eau | 30 |
| 5-4. Lois de transferts thermique et hydrique | 31 |
| 5-5. Valeur du tampon hydrique (MBV) | 35 |
| 6. Outils de modélisation | 36 |
| 6-1. L'humidité et les codes de simulation énergétiques | 36 |
| 6-2. Modèles d'humidité de TRNSYS : Stockage de surface et profondeur | 38 |
| 6-3. Modèle couplé de Wufi | 38 |
| Conclusion | 39 |

Chapitre II : Monitoring des maisons habitées

| | |
|---|----|
| Introduction..... | 40 |
| 1. Choix des maisons (en Algérie, en France) | 40 |
| 2. Instrumentations | 41 |
| 3. Maison en terre et paille à Ouled Ammar (Barika - Algérie) | 44 |
| 3-1. Caractérisation climatique de l'aire d'étude | 44 |
| 3-1-1. Paramètres climatiques | 44 |
| 3-1-2. Etude bioclimatique | 46 |
| 3-1-3. Micro climat | 47 |

xii

| | |
|--|----|
| 6-2-1. Enveloppe et matériaux | 81 |
| 6-3. Monitoring et interprétation | 81 |
| 6-3-1. Appareils et points de mesure | 81 |
| 6-3-2. Résultats de mesure | 82 |
| 6-3-2-1. Etude des températures et hygrométrie de l'air: Période été | 82 |
| 7. Evaluation de la consommation énergétique des maisons | 85 |
| 7-1. Etude de la consommation énergétique de la maison terre/paille | 85 |
| 7-2. Etude de la consommation énergétique de la maison pierre | 86 |
| 7-3. Etude de la consommation énergétique de la maison plaque de plâtre | 86 |
| 7-4. Etude de la consommation énergétique de la maison à ossature bois | 87 |
| 8. Simulation des transferts de chaleur et de masse des maisons par TRNSYS | 89 |
| 8-1. Comparaison mesures / simulation : maison en pierre | 90 |
| 8-2. Comparaison mesures / simulation : maison en terre | 93 |
| Conclusion | 96 |

Chapitre III : Développement des modèles de transferts couplés

| | |
|--|-----|
| Introduction..... | 98 |
| 1. Modélisation numérique d'une paroi par Différences Finies | 98 |
| 1-1. Principes généraux de discrétisation | 98 |
| 1-1-1. Discrétisation spatiale | 98 |
| 1-1-2. Discrétisation temporelle | 99 |
| 1-1-3. Bilan thermique de la tranche | 100 |
| 1-2. Discrétisation des équations des transferts thermo hydriques | 101 |
| 1-2-1. Equation en partie courante du matériau | 101 |
| 1-2-2. Equation d'échanges surfaciques | 102 |
| 1-3. Traitement du couplage | 104 |
| 1-4. Calculs particuliers | 105 |
| 1-4-1. Pression de vapeur saturante | 105 |
| 1-4-2. Isotherme de sorption à une branche et capacité hydrique | 106 |
| 1-4-3. Coefficient d'échanges superficiels thermiques et hydriques | 106 |
| 1-4-4. Densités surfaciques de flux thermique et hydrique | 107 |
| 1-4-5. Rayonnement solaire | 107 |
| 2. Implantation du modèle dans l'environnement aux Eléments Finis Cast3M | 109 |

| | |
|---|-----|
| 2-1. Traitement des équations de transferts | 109 |
| 2-1-1. Equation de bilan thermique | 110 |
| 2-1-2. Equation de bilan hydrique | 110 |
| 2-1-3. Equations d'échanges superficiels | 110 |
| 2-2. Algorithme pour le traitement du couplage | 112 |
| 3. Prise en compte de l'hystérésis et des isothermes partielles | 112 |
| 4. Mise en œuvre du modèle numérique à l'échelle de l'enveloppe | 113 |
| 4-1. Bilan de l'air intérieur de la zone | 113 |
| 4-1-1. Bilan thermique | 113 |
| 4-1-2. Bilan hydrique | 115 |
| 4-2. Traitement spécifique des inconnues de zone | 115 |
| 4-3. Mise en œuvre pratique | 116 |
| 5. Identification de paramètres par la méthode du simplexe | 117 |
| Conclusion | 118 |

Chapitre IV : Caractérisation thermo hydrique à l'échelle du matériau

| | |
|--|-----|
| Introduction | 119 |
| 1. Caractérisation des propriétés de transfert de masse | 119 |
| 1-1. Protocole expérimental | 119 |
| 1-1-1. Préparation des échantillons | 119 |
| 1-1-2. Evolution de la teneur en eau moyenne selon la méthode gravimétrique | 120 |
| 1-2. Isothermes de sorption des matériaux | 122 |
| 1-3. Capacité hydrique des matériaux | 123 |
| 1-4. Propriétés de diffusion | 124 |
| 1-5. Mesure de la MBV (Moisture Buffer Value) | 128 |
| 2. Caractérisation des propriétés de transfert de chaleur | 133 |
| 2-1. Mesure de la conductivité thermique | 133 |
| 2-2. Masse volumique et capacité thermique | 137 |
| Conclusion | 141 |

Chapitre V : Etude thermo hydrique à l'échelle de la paroi

| | |
|--|-----|
| Introduction | 142 |
| 1. Protocole expérimental | 142 |
| 1-1. Double enceinte climatique | 142 |
| 1-1-1. Contrôle des ambiances et bilans | 143 |
| 1-1-2. Performances et caractéristiques de l'enceinte | 144 |
| 1-2. Instrumentation du mur de terre crue | 144 |
| 2. Chargements hydriques | 146 |
| 2-1. Séchage du mur et stabilisation sous gradient | 146 |
| 2-2. Gradients d'humidité relative 50-80 %HR | 148 |
| 2-3. Gradients d'humidité relative 50-90 %HR et comportement libre | 151 |
| 2-4. Créneaux multiples | 152 |
| 3. Modélisation numérique | 154 |
| 3-1. Maillage et conditions aux limites | 154 |
| 3-2. Implémentation éléments finis | 155 |
| 3-3. Optimisation du modèle | 156 |
| 3-3-1. Perméabilité à la vapeur d'eau | 157 |
| 3-3-2. Chaleur de sorption | 158 |
| 3-3-3. Coefficients d'échanges surfaciques thermiques | 158 |
| 3-4. Modélisation phase gradient d'humidité relative 50-80 %HR | 158 |
| 3-5. Modélisation phase créneaux multiples | 159 |
| Conclusion | 161 |

Chapitre VI : Caractérisation thermo hydrique à l'échelle de l'enveloppe

| | |
|--|-----|
| Introduction | 162 |
| 1. Protocole expérimental | 162 |
| 1-1. Présentation de la cellule-test en béton de bois | 162 |
| 1-2. Instrumentation | 164 |
| 1-3. Présentation synthétique du programme expérimental | 166 |
| 2. Modélisation par éléments finis | 168 |
| 3. Etude du comportement de la cellule-test en béton de bois | 170 |
| 3-1. Séquence passive | 170 |
| 3-1-1. Analyse des mesures | 170 |

| | |
|---|-----|
| 3-1-2. Calcul des profils hygrothermiques dans les parois | 172 |
| 3-1-3. Simulation hygrothermique unizone | 174 |
| 3-2. Séquence de chauffage | 176 |
| 3-3. Séquences longues d'humidification | 178 |
| 3-4. Evolution des profils hydriques à long terme | 182 |
| 3-5. Créneaux courts d'humidification | 182 |
| Conclusion | 184 |
| Conclusion générale | 186 |
| Références bibliographiques | 189 |
| Annexes | |
| Annexe A : Monitoring des maisons | 202 |
| Annexe B : Propriétés de transfert de masse | 245 |
| Annexe C : Caractérisation de la cellule-test en rondins | 255 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1 : Démarche adoptée dans l'étude | 4 |
| Figure I-1 : Exemple de projets en bois en France | 8 |
| Figure I-2 : Exemples de forêts algériennes | 9 |
| Figure I-3 : Maison en terre (mélangée aux herbes) à Ghardaia..... | 9 |
| Figure I-4 : Utilisation du palmier (tronc et feuilles) dans la construction à Ghardaia | 10 |
| Figure I-5 : Etat des maisons en terre en Algérie | 10 |
| Figure I-6 : L'utilisation du plâtre et du mortier de chaux dans la construction à Ghardaia | 11 |
| Figure I-7 : Exemples d'architecture en pierre en Algérie | 11 |
| Figure I-8 : Énergie et puissance maximale de refroidissement requise pour climatiser une chambre à coucher (24 °C et 50% d'HR) | 25 |
| Figure I-9 : Transfert de chaleur et de masse à travers la paroi hygroscopique | 26 |
| Figure I-10 : Modes de transfert d'humidité et sites de sorption dans le bois | 27 |
| Figure I-11 : Allure générale d'une isotherme de sorption/désorption | 28 |
| Figure I-12 : Construction d'une courbe isotherme partielle | 29 |
| Figure I-13 : Niveau d'énergie de l'eau dans le bois par rapport à l'eau libre | 31 |
| Figure I-14 : Représentation schématique des bilans thermiques et hydriques sur une tranche infinitésimale de matériau | 34 |
| Figure II-1 : Situation géographique des maisons choisies pour le monitoring | 40 |
| Figure II-2 : Enregistreur de température et d'humidité relative « LogTag » | 41 |
| Figure II-3 : Enregistreur de température surfacique « EL-USB-TC-LCD » | 42 |
| Figure II-4 : Capteur capacitif de température et d'humidité relative «FHA646-E1».. | 42 |
| Figure II-5 : Compteur d'impulsion « Ahlborn ZA9909AK2U » | 43 |
| Figure II-6 : Module d'acquisition « ALMEMO 8590-9 »..... | 43 |
| Figure II-7 : Caractéristiques climatiques de la région de « Biskra » | 45 |
| Figure II-8 : Diagramme ombrothermique de Biskra | 45 |
| Figure II-9 : Diagramme solaire de Biskra (zone de surchauffe en gris) | 46 |
| Figure II-10 : Diagramme psychrométrique de la région de Biskra | 46 |
| Figure II-11 : Environnement de l'aire d'étude « Ouled Ammar » | 47 |

| | |
|--|----|
| Figure II-12 : Situation de la maison en terre et paille | 47 |
| Figure II-13 : Détails de toiture et paroi externe | 48 |
| Figure II-14 : Moyens de régulation thermique utilisés « maison en terre et paille ».. | 48 |
| Figure II-15 : Périodes d'enregistrement et de chauffage (Maison en terre et paille).. | 49 |
| Figure II-16 : Plan de la maison terre/paille et points de mesure | 49 |
| Figure II-17 : Comparaison des températures intérieures dans le séjour S.E et la chambre N.O avec les limites de confort/T ASHRAE dans la région, période été (du 01/06 au 31/08/2011 | 52 |
| Figure II-18 : Comparaison des températures intérieures dans le séjour S.E et la chambre N.O avec les limites de confort/T de la norme européenne (EN 15251), saison d'été (du 01/06 au 31/08/2011) « maison en terre et paille» | 54 |
| Figure II-19 : Comparaison de l'humidité relative intérieure dans le séjour et la chambre avec les limites de confort / HR de ASHRAE dans la région : saison d'été du 01/6 au 31/8/2011« maison en terre et paille» | 55 |
| Figure II-20 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de séjour, semaine de canicule « maison en terre et paille » | 56 |
| Figure II-21 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de la chambre semaine de canicule « maison en terre et paille » | 56 |
| Figure II-22 : Variation horaire journalière de la température extérieure et intérieure dans le séjour S.E : période d'été, journée de canicule «maison en terre et paille» | 57 |
| Figure II-23 : Variation des températures moyennes journalières intérieure et extérieure : séjour S.E, saison d'été « maison en terre et paille» | 58 |
| Figure II-24 : Variation de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de séjour période estivale « maison en terre et paille » | 58 |
| Figure II-25 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure, extérieure et de la température intérieure : cas de séjour, période estivale « maison en terre et paille» | 59 |
| Figure II-26 : Variation horaire de l'humidité spécifique extérieure, intérieure et la température intérieure : cas de séjour, période été « maison en terre et paille» | 59 |
| Figure II-27 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure, extérieure et l'humidité spécifique intérieure : cas de séjour, période estivale « maison en terre et paille» | 60 |

| | |
|---|----|
| Figure II-28 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas du séjour, période hivernale « maison en terre et paille» | 61 |
| Figure II-29 : Variation horaire de la température intérieure et l'humidité spécifique intérieure et extérieure : cas du séjour, période hivernale «maison en terre et paille».. | 62 |
| Figure II-30 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas du séjour, période hiver « maison en terre et paille» | 63 |
| Figure II-31 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de séjour, période mi-saison « maison en terre et paille» | 63 |
| Figure II-32 : Variation horaire de la température intérieure et l'humidité spécifique intérieure et extérieure : cas de séjour, période mi-saison «maison en terre et paille» | 64 |
| Figure II-33 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de séjour, période mi-saison «maison en terre et paille» | 64 |
| Figure II-34 : Variation des moyennes journalières de la température intérieure et des humidités intérieure et extérieure cas de séjour : saison hiver-automne, maison terre/paille | 65 |
| Figure II-35 : Situation de la maison en pierre | 66 |
| Figure II-36 : Vues sur la maison (côtés rue et cour) | 67 |
| Figure II-37 : Trajectoire solaire et prospect rue (maison en pierre) | 67 |
| Figure II-38 : Détail de l'enveloppe de la maison en pierre | 68 |
| Figure II-39 : Plan de Rez-De-Chaussée et points de mesure (Maison en pierre) | 69 |
| Figure II-40 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure, cas de la chambre S.O, semaine de canicule « maison en pierre» | 70 |
| Figure II-41 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure, cas de séjour S.O, semaine de canicule « maison en pierre » | 71 |
| Figure II-42 : Variation horaire journalière de la température extérieure et intérieure dans la chambre S.O : période été, journée de canicule « maison en pierre » | 71 |
| Figure II-43 : Variation horaire des températures intérieure, extérieure ambiante et surfacique, cas de la chambre S.O, mois d'août 2012 « maison en pierre » | 72 |
| Figure II-44 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de la chambre S.O, semaine de canicule « maison en pierre » | 72 |

| | |
|--|----|
| Figure II-45 : Variation de l'humidité relative intérieure et extérieure et la température intérieure et extérieure dans la chambre S.O, journée de canicule «maison en pierre » | 73 |
| Figure II-46 : Variation horaire de l'humidité spécifique extérieure, intérieure et de la température extérieure, intérieure, cas de la chambre S.O : semaine type, période estivale | 74 |
| Figure II-47 : Variation horaire de l'humidité spécifique intérieure et de la température extérieure intérieure : cas du séjour et de la chambre S.O, semaine type, période estivale | 75 |
| Figure II-48 : Situation de la maison en plaques de plâtre | 76 |
| Figure II-49 : Détail de la paroi extérieure (maison en plaques de plâtre) | 76 |
| Figure II-50 : Plan de maison et points de mesure | 77 |
| Figure II-51 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure, cas de séjour N.O/S.E, semaine de canicule « maison en plaques de plâtre » | 78 |
| Figure II-52 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure, cas de la chambre N.O, semaine de canicule « maison en plaques de plâtre » | 78 |
| Figure II-53 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de la chambre N.O, semaine de canicule « Maison plaques de plâtre » | 79 |
| Figure II-54 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure, extérieure et l'humidité spécifique intérieure : cas de la chambre N.O, semaine de canicule « M. plaques de plâtre » | 79 |
| Figure II-55 : Situation et plan de masse de la maison ossature bois | 80 |
| Figure II-56 : Vue perspective sud-est de la maison à ossature bois | 81 |
| Figure II-57 : Plans R.D.C, étage et points de mesure (séjour/S.A.M : pièce 1 d'investigation, chambre d'enfant : pièce 2 d'investigation) | 82 |
| Figure II-58 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de séjour, période estivale « maison à ossature bois » | 83 |
| Figure II-59 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de la chambre sud, période estivale « maison à ossature bois » | 83 |
| Figure II-60 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de séjour, période estivale « maison à ossature bois » | 84 |

| | |
|--|-----|
| Figure II-61 : Variation horaire de la température et l'humidité spécifique, intérieures et extérieures : cas de séjour, période estivale « maison à ossature bois » | 84 |
| Figure II-62 : Consommation énergétique annuelle de la maison en pierre | 86 |
| Figure II-63 : Consommation énergétique annuelle de la maison en plaques de plâtre | 87 |
| Figure II-64 : Variation horaire des températures intérieures/extérieures et la consommation électrique, saison d'été « maison à ossature bois » | 87 |
| Figure II-65 : Variation horaire des températures intérieures/extérieures et la consommation électrique, saison d'hiver « maison à ossature bois » | 88 |
| Figure II-66 : Schéma du programme de simulation (.tpf) sur TRNSYS avec le fichier bâtiment multi zones, le fichier météo et les mesures intérieures « maison en pierre ».. | 90 |
| Figure II-67 : Comparaison entre températures mesurées et simulées par TRNSYS, période été (14/7 au 13/9/2011) « maison en pierre » | 91 |
| Figure II-68 : Comparaison entre températures mesurées et simulées par TRNSYS, semaine d'été (14 au 21/8/2011) « maison en pierre » | 91 |
| Figure II-69 : Comparaison entre humidités relatives mesurées et simulées par TRNSYS, période été (14/7 au 13/09/2011) « maison en pierre » | 92 |
| Figure II-70 : Comparaison entre humidités relatives mesurées et simulées par TRNSYS, semaine d'été (18 au 25/8/2011) « maison en pierre » | 92 |
| Figure II-71 : Variation de l'humidité relative mesurée et simulée par les modèles simple et buffer, semaine d'été (18 au 25/8/2011) « maison en pierre » | 93 |
| Figure II-72 : Comparaison entre températures mesurées et simulées par TRNSYS, semaine d'été (14 au 21/8/2011) « maison en terre et paille » | 93 |
| Figure II-73 : Comparaison entre humidités relatives mesurées et simulées par TRNSYS, semaine d'été (14 au 21/8/2011) « maison en terre et paille » | 94 |
| Figure II-74 : Comparaison entre humidités relatives mesurées et simulées par TRNSYS (modèle simple), semaine d'hiver (01 au 08/12/2011) « maison en terre et paille » | 95 |
| Figure III-1 : Discrétisation spatiale | 99 |
| Figure III-2 : Différentes dérivées temporelles sur un intervalle de temps | 100 |
| Figure III-3 : discrétisation spatiale des demi-tranches en surface | 102 |
| Figure III-4 : Organigramme de l'algorithme de couplage, appliqué à une paroi | 105 |
| Figure III-5 : Echanges convectifs thermique et hydrique | 107 |

| | |
|--|-----|
| Figure III-6 : Flux solaire reçu par une surface inclinée | 108 |
| Figure III-7 : Echange superficiel | 111 |
| Figure III-8 : Bilan thermique de l'ambiance intérieure | 114 |
| Figure III-9 : Modes de saisie de la géométrie d'enveloppe en différences finies | 116 |
| Figure III-10 : Modes de saisie de la géométrie d'enveloppe en éléments finis | 117 |
| Figure III-11 : Schéma de la démarche adoptée dans la modélisation | 118 |
| Figure IV-1 : Carottage et découpage des éprouvettes du béton de bois | 119 |
| Figure IV-2 : Eprouvettes des matériaux béton de bois, terre crue, travertin et plaque de plâtre | 120 |
| Figure IV-3 : Enceinte climatique et pesée des échantillons | 121 |
| Figure IV-4 : Teneur en eau du matériau béton de bois | 121 |
| Figure IV-5 : Courbes isothermes identifiées à partir des points de paliers (béton de bois) | 122 |
| Figure IV-6 : Isothermes de sorption des matériaux | 123 |
| Figure IV-7 : Capacité hydrique des matériaux | 124 |
| Figure IV-8 : Modélisation des échantillons du béton de bois, maillage et exemples de champs lors d'une adsorption | 125 |
| Figure IV-9 : Perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau, cas du béton de bois | 126 |
| Figure IV-10 : Perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau, cas de la terre crue | 126 |
| Figure IV-11 : Comparaison entre courbes expérimentales et modèle EF après identification de la perméabilité, cas du béton de bois | 127 |
| Figure IV-12 : Cycles MBV des échantillons moyens de béton de bois | 129 |
| Figure V-13 : Cycles MBV des gros échantillons de béton de bois | 130 |
| Figure IV-14 : MBV pratiques des matériaux testés, comparées à la classification du projet Nordtest | 130 |
| Figure IV-15 : Variation de masse des moyens et gros échantillons lors des cycles MBV | 131 |
| Figure IV-16 : Evolution de la température ambiante dans l'enceinte et des températures au centre et aux surfaces de la brique de terre pendant les cycles de la MBV | 132 |

| | |
|---|-----|
| Figure IV-17 : Evolution de l'humidité relative ambiante dans l'enceinte et de l'humidité au centre de la brique de terre pendant les cycles de la MBV | 132 |
| Figure IV-18 : Mesure de la conductivité thermique des différents matériaux par la méthode du disque chaud : béton de bois, plâtre, terre comprimée et le travertin | 134 |
| Figure IV-19 : Principe de la méthode du disque chaud | 134 |
| Figure IV-20 : Variation de λ en fonction de w , cas du béton de bois | 134 |
| Figure IV-21 : Variation de λ en fonction de % w , cas de brique de terre | 135 |
| Figure IV-22 : Variation de λ en fonction de % w , cas du travertin | 136 |
| Figure IV-23 : Variation de λ en fonction de % w , cas de la plaque de plâtre | 137 |
| Figure IV-24 : Schéma et photographie du calorimètre Calvet C80 de Setaram | 138 |
| Figure IV-25 : Mesure de la capacité calorifique : mise à l'étuve de l'échantillon broyé, pesage, introduction dans la cellule et traitement de données | 139 |
| Figure IV-26 : Capacité calorifique sèche du béton de bois | 139 |
| Figure IV-27 : Capacité calorifique sèche de la brique de terre | 140 |
| Figure IV-28 : Capacité calorifique sèche de la pierre travertin..... | 140 |
| Figure IV-29 : Capacité calorifique sèche de la plaque de plâtre | 141 |
| Figure V-1 : Enceinte bi-climatique : volume schématique et vue de face | 142 |
| Figure V-2 : Schéma de principe de l'enceinte bi-climatique et points de mesure | 143 |
| Figure V-3 : Monitoring et points de mesure de la paroi en terre | 145 |
| Figure V-4 : Nomenclature des capteurs de mesure | 145 |
| Figure V-5 : L'humidité relative ambiante lors de la 1 ^{ère} phase de séchage à 50%HR | 146 |
| Figure V-6 : Température ambiante lors de la 1 ^{ère} phase de séchage à 50 %HR | 147 |
| Figure V-7 : Evolution de l'humidité relative dans la paroi | 147 |
| Figure V-8 : Distribution de température dans la paroi | 148 |
| Figure V-9 : Gradient d'humidité relative 50-80%HR | 149 |
| Figure V-10 : Températures ambiantes sous gradient 50%HR-80%HR | 149 |
| Figure V-11 : Profils hydriques dans la paroi sous gradient 50%HR-80%HR | 150 |
| Figure V-12 : Profils de température sous gradient hydrique 50-80 %HR | 150 |
| Figure V-13 : Profil d'humidité relative lors d'un choc bref à 90%HR | 151 |
| Figure V-14 : Profils de température lors d'un choc bref à 90%HR | 152 |
| Figure V-15 : Humidité relative ambiante durant des chocs hydriques successifs | 153 |
| Figure V-16 : Profils d'humidité interne durant des chocs hydriques successifs | 153 |
| Figure V-17 : Profils de températures durant des chocs hydriques successifs | 154 |

| | |
|--|-----|
| Figure V-18 : Maillage éléments finis d'une bande de la paroi | 155 |
| Figure V-19 : Profils hydriques en séchage, comparaison modèle et expérience | 156 |
| Figure V-20 : Profils de température en séchage, comparaison modèle et expérience | 157 |
| Figure V-21 : Perméabilités à l'échelle matériau et paroi (simplexe) | 157 |
| Figure V-22 : Profils hydriques mesurés et modélisés en phase d'adsorption | 159 |
| Figure V-23 : Profils thermiques mesurés et modélisés en phase d'adsorption | 159 |
| Figure V-24 : Profils hydriques mesurés et modélisés en phase sous créneaux | 160 |
| Figure V-25 : Profils thermiques mesurés et modélisés en phase sous créneaux | 161 |
| Figure VI-1 : Cellules-test béton de bois et fuste dans leur environnement | 163 |
| Figure VI-2 : Dimensions de la cellule-test béton de bois | 163 |
| Figure VI-3 : Centrales d'acquisition | 164 |
| Figure VI-4 : Appareillage de la cellule-test béton de bois | 165 |
| Figure VI-5 : Valeurs journalières moyennes mesurées durant la période d'étude | 167 |
| Figure VI-6 : Modèle géométrique de la cellule-test béton de bois | 168 |
| Figure VI-7 : Variation de la température intérieure, extérieure, surfacique et dans le matériau « béton de bois, semaine d'hiver » | 171 |
| Figure VI-8 : Variation de la température intérieure, extérieure, surfacique et dans le matériau « béton de bois, semaine d'été » | 172 |
| Figure VI-9 : Profils hydriques dans la paroi sud au cours d'une année passive | 173 |
| Figure VI-10 : Champ de température dans les parois (19/08/2012) | 173 |
| Figure VI-11 : Profils thermiques de la toiture sud, le 19 août 2012 | 174 |
| Figure VI-12 : Profils hydriques de la toiture sud, le 19 août 2012 | 174 |
| Figure VI-13 : Evolutions mesurée et calculée de la température de zone (période estivale) | 175 |
| Figure VI-14 : Evolutions mesurée et calculée de l'humidité relative de zone (période estivale) | 176 |
| Figure VI-15 : Evolutions des pressions de vapeur intérieure et extérieure | 176 |
| Figure VI-16: Températures intérieures et puissance de chauffage (période hivernale) | 177 |
| Figure VI-17: Humidités relatives intérieures en période hivernale chauffée | 178 |
| Figure VI-18 : Pressions de vapeur intérieures et extérieure | 178 |
| Figure VI-19 : Séquences d'humidification par évaporation d'eau | 179 |
| Figure VI-20 : Humidités relatives lors d'une séquence d'humidification adiabatique | 180 |

| | |
|--|-----|
| Figure VI-21 : Températures lors d'une séquence d'humidification adiabatique et effet de la chaleur de sorption | 180 |
| Figure VI-22 : Puissances lors de séquences d'humidification adiabatique : comparaison entre une modélisation TRNSYS et mesure | 181 |
| Figure VI-23 : Evolution à long terme des profils hydriques dans le mur sud | 181 |
| Figure VI-24 : Réponse hydrique à trois créneaux successifs d'injection de vapeur ... | 184 |
| Figure VI-25 : Réponse thermique à trois créneaux successifs d'injection de vapeur. | 184 |

Liste des tableaux

| | |
|---|-----|
| Tableau I-1 : Les différents mécanismes de transport d'humidité dans les composants du bâtiment | 30 |
| Tableau I-2 : Equations de diffusion thermique et hydrique | 33 |
| Tableau II-1 : Récapitulatif des caractéristiques des maisons choisies pour le monitoring | 41 |
| Tableau II-2 : Caractéristiques des capteurs de mesure utilisés dans la maison à ossature bois | 43 |
| Tableau II-3 : Coordonnées des sommets du polygone de confort thermique annuel de la région de Biskra | 51 |
| Tableau II-4 : Températures de confort thermique mensuel de Biskra et O. Ammar selon la norme ASHRAE | 52 |
| Tableau II-5 : Températures de confort de Biskra et O. Ammar selon la norme européenne | 54 |
| Tableau II-6 : Comparaison des résultats de monitoring entre le séjour et la chambre | 66 |
| Tableau IV-1 : Paramètres d'isothermes de sorption | 123 |
| Tableau IV-2 : Paramètres non linéaires | 127 |
| Tableau IV-3 : MBV calculée sur les 3 derniers cycles des échantillons moyens du béton de bois | 129 |
| Tableau IV-4 : MBV calculée sur les 3 derniers cycles des gros échantillons du béton de bois | 129 |
| Tableau IV-5 : Valeurs des MBV des matériaux testés | 131 |
| Tableau IV-6 : Caractéristiques du travertin | 136 |
| Tableau VI-1 : Caractéristiques des capteurs de mesure utilisés dans la cellule-test ... | 166 |
| Tableau VI-2 : Caractéristiques détaillées des séquences expérimentales | 167 |
| Tableau VI-3 : Valeurs des paramètres d'entrée du modèle | 170 |

Nomenclature

| | | |
|-------------------------|---|---|
| a | Diffusivité thermique | $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ |
| A_B | Puissance moyenne mesurée pour le blanc | mW |
| A_e | Puissance moyenne mesurée pour l'échantillon | mW |
| A_i | Surface paroi | m^2 |
| A_j | Surface paroi | m^2 |
| B_v^t | Bilan de diffusion de vapeur de la tranche à l'instant t | $\text{kg}.\text{m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ |
| C_e | Capacité thermique de l'eau | $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ |
| C_h | Capacité thermique humide | $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ |
| C_p | Capacité calorifique à pression constante | $\text{J}.\text{kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ |
| D_w | Coefficient de diffusion en phase liquide | $\text{m}^2.\text{s}^{-1}$ |
| G_h | Flux solaire global horizontal | $\text{W}.\text{m}^{-2}$ |
| H_L | Chaleur latente de vaporisation | J/kg |
| h_t | Coefficient d'échange thermique superficiel | $\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ |
| h_{tc} | Coefficient d'échange thermique convectif | $\text{W}.\text{m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ |
| h_v | Coefficient d'échange hydrique superficiel | $\text{s}.\text{m}^{-1}$ |
| H_r | Humidité relative | % |
| k | Paramètre de non linéarité | |
| M_h | Masse humide | kg |
| M_{\min} | Masse minimale de l'échantillon | kg |
| M_{\max} | Masse maximale de l'échantillon | kg |
| M_s | Masse sèche | kg |
| M_w | Masse d'eau | kg |
| MBV_{pratique} | Capacité de tampon hydrique | $\text{g}/\text{m}^2\% \text{RH}$ |
| P | Précipitation totale annuelle | mm |
| P_{ch} | Puissance délivrée par le système de chauffage | W |
| P_{chconv} | Partie convective des charges internes | W |
| P_{fr} | Puissance délivrée par le système de refroidissement | W |
| p_v | pression de vapeur | Pa |
| p_{va} | Pression de vapeur dans l'air ambiant | Pa |
| p_{vs} | pression de vapeur saturante | Pa |
| Q_{mv} | Bilan des débits massiques d'eau assurés par les charges internes, les équipements d'humidification et de déshumidification | $\text{kg}.\text{s}^{-1}$ |
| S | Surface exposée | m^2 |
| t | Temps | s |
| T | Température | K |

| | | |
|--------------------------|--|----------------------------|
| T_a | Température ambiante | K |
| T_c | Température de confort | K |
| T_m | Température moyenne | K |
| T_i^t | Température au point i à l'instant t | K |
| U_{wj} | Coefficient de transmission thermique des parois vitrées | $W.m^{-2}.K^{-1}$ |
| v | Vitesse de montée en température | $K.s^{-1}$ |
| w | Teneur en eau | |
| \bar{w} | Teneur en eau pondérale moyenne | |
| w_s | Teneur en eau de saturation | |
| x_{int} | Humidité spécifique de l'air intérieur | kg(eau)/kg(air sec) |
| β | Inclinaison de la paroi (0° = horizontale) | $^\circ$ |
| γ | azimut de la paroi | $^\circ$ |
| θ | Angle entre le rayon direct et la normale à la surface réceptrice | $^\circ$ |
| λ | Conductivité thermique | $W.m^{-1}.K^{-1}$ |
| ξ | capacité hydrique | |
| δ | Perméabilité à la vapeur | $kg.s^{-1}.m^{-1}.Pa^{-1}$ |
| δ_0 | Perméabilité anhydre | $kg.s^{-1}.m^{-1}.Pa^{-1}$ |
| ρ_h | Masse volumique humide | kg/m^3 |
| ρ_s | Masse volumique sèche | kg/m^3 |
| $(\rho C)^*$ | Chaleur volumique du matériau humide | $J.m^{-3}.K^{-1}$ |
| τ | Intervalle de temps | s |
| ϕ | latitude | $^\circ$ |
| φ_t | Densité du flux thermique | $W.m^{-2}$ |
| φ_w | Densité du flux hydrique | $kg.m^{-2}.s^{-1}$ |
| φ_{abs} | Densité du flux solaire absorbé | $W.m^{-2}$ |
| φ_d | Densité du flux sortant par la droite | $W.m^{-2}$ |
| φ_{dirn} | Rayonnement solaire direct normal | $W.m^{-2}$ |
| φ_g | Densité du flux entrant par la gauche | $W.m^{-2}$ |
| $\varphi_{abs}^{t+\tau}$ | Densité du flux thermique d'origine extérieure absorbé par la surface | $W.m^{-2}$ |
| φ_{dih} | Densité du flux diffus horizontal | $W.m^{-2}$ |
| φ_{inti} | Densité du flux surfacique échangé entre la surface intérieure de la paroi i et l'ambiance | $W.m^{-2}$ |
| $\varphi_{wv\ int_i}$ | Densité du flux massique surfacique échangé sur la face interne de la paroi $n^\circ i$ | $W.m^{-2}$ |

Introduction générale

«Travaillez sans relâche à acquérir la sagesse, comme si vous aviez toujours à acquérir davantage. De plus, craignez de perdre ce que vous avez acquis. Celui qui ne progresse pas chaque jour, recule chaque jour.»

Confucius

Optimiser les performances d'un bâtiment, c'est repenser son enveloppe dans sa globalité dès la conception. C'est surtout, gagner en confort thermique, en consommation énergétique et en respect de l'éthique environnementale. L'enveloppe est conçue pour réguler les flux dynamiques, qu'ils soient thermiques ou hydriques, qui s'établissent entre l'ambiance intérieure et extérieure. Le choix des matériaux qui la constituent est primordial sur tous les plans.

L'importation des modèles d'urbanisme et d'architecture internationaux qui se servent de matériaux et de prototypes préétablis pose, à la fois, la problématique d'hiver et d'été en Algérie. L'utilisation intense des moyens mécaniques de régulation thermique s'avère utile mais ceci conduit à l'abus de consommation d'énergies fossiles avec une atteinte à l'environnement.

Le recours à la climatisation en est un exemple frappant, contradictoire avec les objectifs nationaux de limitation des émissions de gaz à effet de serre (GES). Multiples conséquences sont engendrées : consommations électriques supplémentaires, forts appels de puissance en été et dissémination de fluides frigorigènes dont le confinement n'est pas parfait et dont les rejets dans l'atmosphère représentent un impact néfaste sur l'environnement. Chaque année connaît ses nouveaux records de consommation d'électricité dus à la multiplication des postes énergivores, comme les climatiseurs dans les ménages algériens (3 climatiseurs en moyenne par maison). Un pic de 9000 MW de puissance appelée a été enregistré en 2012 passant à 10464 MW en 2013 [CDER, 2013]. Avec 14 % de croissance d'une année sur l'autre, face à la croissance mondiale qui ne dépasse pas 2 %, l'Algérie est l'un des pays au monde où le pic de consommation d'électricité évolue le plus rapidement. Les conséquences en sont connues : délestages, coupures inopinées et mouvements de colère des populations les plus exposées.

Egalement, la problématique d'hiver persiste avec une large bande de climats contrastés (hauts plateaux), très chauds en été et froids en hiver. De plus, aucune exigence thermique n'est incluse dans les codes règlementaires, même dans ces régions à climat froid. Les bâtiments, modernes ou pas, ne sont pas isolés. La consommation du gaz naturel est donc très élevée contribuant à l'émission d'une grande quantité de CO_2 et d'autres gaz contaminants. Une famille moyenne consomme jusqu'à 550 kWh/m² an, ce qui conduit à des émissions de 3,9 t CO_2 /hab an [González, 2009]. Pourtant, la réduction annuelle possible de 2.000 m³ de gaz permettrait d'économiser 5,7 t d'émissions de CO_2 par ménage [González et al, 2007].

Pour la France, il s'agit surtout de la problématique d'hiver. Cependant, l'année 2014 a été la plus chaude depuis 1900 [MEDDE, 2015(a)], ce qui n'écartera pas non plus la problématique

d'été. Plus particulièrement, l'hiver doux s'est traduit par des besoins en chauffage dont la consommation totale d'énergie primaire est arrivée à 257 million tonne équivalent pétrole (Mtep) [MEDDE, 2015(b)]. La consommation moyenne annuelle est en effet proche de 400 kWh d'énergie primaire par m² chauffé. Le secteur du bâtiment est responsable de 44% de la consommation finale d'énergie dans le pays, qui présente 70 Mtep [ADEME, 2015]. Ceci contribue à l'émission de 23% de GES et 5,1 t CO₂/hab [MEDDE, 2015 (c)].

Pour répondre à ces défis énergétiques et environnementaux, le Grenelle d'environnement vise un double objectif : diviser par 4 les émissions de GES à l'horizon 2050 et réduire de 38% la consommation énergétique dans les bâtiments d'ici 2020. D'autant que la future RT 2020 prévoit que les bâtiments BEPOS devront produire plus d'énergie qu'ils n'en consomment. Nonobstant, ces exigences ont entraîné une évolution des systèmes constructifs pour atteindre la performance énergétique demandée. Les bâtiments sont de plus en plus étanches à l'air et l'isolation des enveloppes est renforcée. En conséquence des phénomènes liés à l'humidité sont provoqués : développement de moisissures, dégradation de la qualité de l'air, condensation dans les parois. La durabilité et la performance énergétique des bâtiments sont ainsi diminuées. Il est donc désormais nécessaire de tenir compte des transferts d'humidité à travers l'enveloppe.

Face à ces constats, il paraît que l'enveloppe à matériaux hygroscopiques est une nouvelle piste prometteuse en termes d'amélioration du confort thermique, de qualité de l'air intérieur [Simonson et al, 2002], de consommation énergétique [Osanyintola, 2006], [Woloszyn et al, 2009] et surtout de régulation de l'humidité intérieure dans les bâtiments [Padfield, 1998], [Zhang et al, 2012]. On prétend par matériaux hygroscopiques, les matériaux aptes à fixer l'humidité. Ceux choisis dans l'étude constituent les matériaux biosourcés comme le bois massif, le béton de bois, la terre/paille. Nous comptons également des matériaux locaux comme le plâtre et la pierre « travertin ».

Les matériaux biosourcés permettent de décarboniser l'environnement bâti. 01 t de bois mise en œuvre dans le bâtiment représente 1,6 t de CO₂ en moins dans l'atmosphère [Perré, 2003]. L'étude montre que l'optimisation de la consommation d'énergie primaire des systèmes constructifs peut être réalisée par le recours aux matériaux naturels, localement disponibles. Ceci pour réduire les coûts énergétiques du transport, tout en limitant l'utilisation de matériaux industrialisés. Les matériaux choisis dans ce cas, doivent avoir une forte masse thermique pour assurer le stockage de la chaleur et l'absorption acoustique [Mendonça, Bragança, 2007].

En revanche, les phénomènes physiques hydriques ne sont pas intégrés aujourd'hui dans la plupart des codes de calcul. Or, l'humidité dans ces matériaux joue un rôle non négligeable tant en confort d'hiver qu'en confort d'été.

A cet effet, l'étude vise une approche expérimentale et numérique du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques. Elle s'inscrit dans un contexte bâtiment/énergie en mettant l'accent sur les effets de l'humidité en termes de confort thermique et de consommation énergétique pour valider un outil numérique développé, destiné à simuler le comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques. On cherche à savoir si le transfert de masse et les échanges convectifs par changement de phase en surface de ces enveloppes génèrent des émissions ou des absorptions de chaleur latente, qui peuvent participer soit au rafraîchissement naturel en été soit à l'apport additionnel de chaleur en période de chauffage.

La thèse s'inscrit dans le cadre d'une cotutelle entre le laboratoire Groupe d'Etudes des Matériaux Hétérogènes « GEMH » de l'Université de Limoges et le laboratoire d'Architecture Bioclimatique et d'Environnement « ABE » de l'Ecole d'architecture de Constantine.

La démarche scientifique retenue consiste à suivre une caractérisation hiérarchique passant d'une échelle à une autre, parallèlement dans les deux parties, expérimentale et constitution/validation du modèle. Une démarche progressive est adoptée de manière à étudier les phénomènes de transfert thermo hydrique localisés à chaque échelle, ce qui permettra de valider les expérimentations et d'en affiner la modélisation.

- **La première échelle** de caractérisation est celle de la maison habitée. Un monitoring a été mené sur quatre maisons, construites avec divers matériaux hygroscopiques (terre/paille, pierre travertin, plaque de plâtre, ossature bois) et situées sous différents climats. Les résultats du monitoring, traités selon une approche bioclimatique, présentent le constat général avec la difficulté de caractérisation thermo hydrique à cette échelle (plusieurs paramètres aléatoires). La simulation thermique dynamique menée via TRNSYS ne reprend pas parfaitement le comportement thermo hydrique des maisons et dévoile les limites des approches dynamiques proposées par les logiciels de simulation non couplés (utilisés aujourd'hui en bureau d'études).
- Une alternative numérique est alors développée en partant de la **2^{ème} échelle**, celle du matériau. Un modèle de transfert de chaleur et de masse couplé est proposé, son implémentation est suggérée selon deux approches, en DF sous VBA et en EF sous Cast3M.

A cette échelle, les propriétés liées au transfert de chaleur et de masse des matériaux sont caractérisées dans le but d'alimenter, à terme, les modèles établis.

- **La 3^{ème} échelle** concerne l'expérimentation thermo hydrique d'une paroi. C'est une échelle intermédiaire de caractérisation permettant de passer de l'échelle matériau à celle de l'enveloppe. Une paroi en terre crue est testée en réponse de sollicitations thermo hydriques dynamiques dans une double enceinte climatique. Les mesures en termes de gradients thermiques et hydriques sont confrontées à un modèle numérique 1D en EF intégrant le couplage thermo-hydrique.
- **La 4^{ème} échelle** (deux cellules test, une en bois massif et l'autre en béton de bois) permet d'identifier les mécanismes de transferts à l'échelle d'une zone interne à enveloppe hygroscopique. Plusieurs scénarios sont étudiés au niveau de la cellule-test béton de bois pour évaluer les performances du modèle thermo hydrique couplé développé.

La motivation finale de cette étude, visée en perspective, est d'appliquer le modèle de transfert couplé établi à l'échelle de la maison habitée, donc sur tous types d'enveloppes hygroscopiques. Le schéma de la figure-1 ci-dessous illustre la démarche retenue.

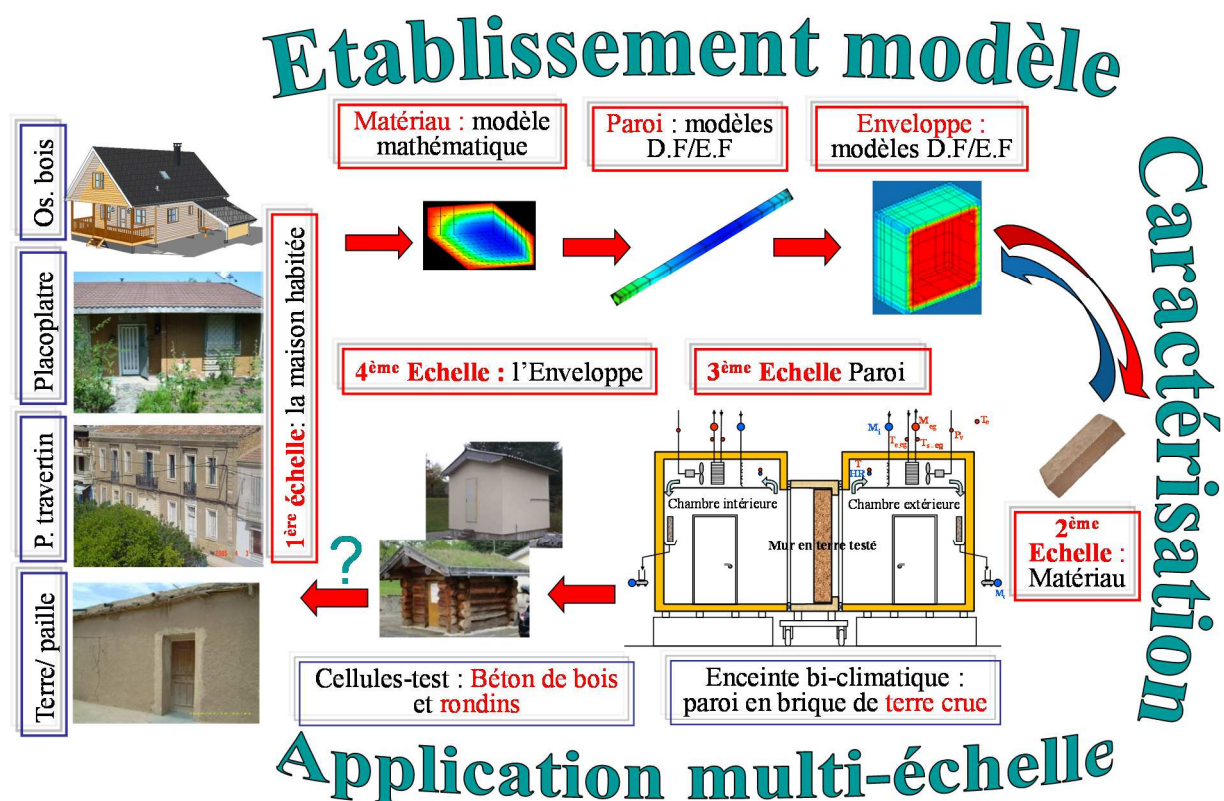


Figure 1 : Démarche adoptée dans l'étude

Le point fort de cette thèse est le développement, à la fois, d'outils numériques de haut niveau en bénéficiant du savoir-faire tant au niveau modèle (implémentation EF/DF sous Cast3M), qu'au niveau expérimentation. Parallèlement, le monitoring, mené sur des maisons habitées offre un plus à la caractérisation de l'enveloppe hygroscopique en conditions réelles (de climat extérieur, d'occupants, etc.). L'ensemble des grandeurs déterminées (isothermes de sorption, capacité hydrique, perméabilité à la vapeur par méthode inverse, et la MBV, etc.) permet d'enrichir les bases de données matériaux. Ces grandeurs sont aussi utilisées comme données d'entrées des modèles.

Cette étude est donc finalement un point de jonction entre la thermique et physique du bâtiment, l'architecture et la bioclimatique ainsi que des méthodes expérimentales d'identification (méthode inverse), d'optimisation (simplexe) et de caractérisation multi-échelles qui apporte une plus-value méthodologique. L'étude doit être considérée comme une contribution à la compréhension du comportement thermo hydrique d'une large gamme de matériaux hygroscopiques et poreux dans des conditions climatiques dynamiques.

Un premier chapitre est consacré à une étude bibliographique générale sur les modes de caractérisation des enveloppes hygroscopiques. La première échelle de caractérisation « monitoring des maisons habitées » intégrant la caractérisation du climat des régions d'étude, l'analyse du niveau de confort thermique, l'étude de température et hygrométrie de l'air intérieur/extérieur et la consommation énergétique de chaque maison fait l'objet du second chapitre. L'implémentation éléments finis et différences finies, de l'ensemble des modèles, est présentée au troisième chapitre. Les quatrième et cinquième chapitres concernent respectivement la caractérisation thermo-hydrique à l'échelle du matériau et de la paroi. Les transferts thermo hydriques au niveau des cellules-test sont étudiés en dernier lieu.

Chapitre I

Synthèse bibliographique sur le comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscoPIques

« La correction de l'erreur est peut-être l'événement le plus sublime de la vie intellectuelle, le signe suprême de notre nécessaire soumission à une réalité plus vaste et de notre incapacité à construire le monde selon nos désirs. »

S.J. Gould

Introduction

Tout élément du bâtiment dans l'environnement où il se trouve est soumis à des gradients de température et d'humidité (différence entre l'ambiance intérieure et extérieure). L'enveloppe du bâtiment est souvent le siège d'un grand nombre de phénomènes d'échanges thermiques et hydriques, couplés et transitoires. Son bon comportement thermo hydrique améliore le confort hygrothermique l'hiver, limite les apports extérieurs en période estivale et, par conséquent, réduit les consommations énergétiques du bâtiment sous un climat donné.

Le comportement thermo hydrique d'un matériau est défini comme le changement des propriétés fonctionnelles qui se produisent en raison de l'échange simultané de chaleur et d'humidité (avec l'air environnant) et du stockage dans le matériau [Kunzel, 1995], [Hall, 2010]. Au sein de l'enveloppe, le comportement thermo hydrique d'un matériau est fortement lié à sa nature et à sa porosité. De ce fait, tous les matériaux ne peuvent avoir les mêmes caractéristiques par rapport aux variations thermiques, hydriques et hygrométriques. Les travaux menés soulignent la difficulté du sujet [C&B, 2012]. Certes, la physique des transferts de l'eau liquide et de la vapeur d'eau au sein d'un matériau est complexe. Nonobstant, la caractérisation du comportement d'un matériau par rapport à ces transferts est nécessaire afin d'en maîtriser et d'en optimiser son utilisation.

Sur ce sujet, les matériaux hygroscopiques, aptes à fixer chimiquement les molécules d'eau, montrent des performances significatives envers les phénomènes hygrothermiques. Certains travaux évaluent l'influence des phénomènes hygrothermiques sur leurs caractéristiques et leur durabilité. D'autres études sont destinées actuellement à la caractérisation et la modélisation du comportement thermo hydrique de ces matériaux, en montrant leur comportement particulier ayant une influence sur le confort hygrothermique intérieur et sur la performance énergétique du bâtiment. D'autres travaux estiment l'effet de « l'inertie hydrique » connue sous le nom de la capacité « tampon hydrique » et la capacité des matériaux hygroscopiques à stocker et déstocker la vapeur d'eau.

Ce premier chapitre présente une vision des travaux qui évaluent l'impact de l'enveloppe hygroscopique (sous différentes échelles et divers climats) sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment. Les études qui répartissent les modèles de transfert existants sont aussi examinées ainsi que les approches retenues dans l'étude des bâtiments.

Bien que les enveloppes hygroscopiques en constituent l'objet, le travail s'intéresse en général à l'enveloppe poreuse qui englobe les matériaux naturels comme la pierre, la terre et la paille, le plâtre, le bois et le béton de bois. Ce chapitre vise donc à poser le cadre de cette étude.

1. La filière et la construction bois en France et en Algérie

Le développement de la construction bois* constitue un enjeu primordial et une réponse efficace pour la réduction des impacts environnementaux liés au secteur du bâtiment. La construction bois présente de nombreux atouts : matière première renouvelable, déchets de chantier réduits, énergie grise faible, fixation du CO_2 , etc.

A ce jour, les techniques conventionnelles conduisent à l'émission d'environ 500 à 1000 kg de CO_2 par m^2 construit. L'utilisation des systèmes constructifs intégrant une plus grande part de matériaux d'origine végétale peut contribuer à faire sensiblement baisser les émissions de gaz à effet de serre (GES). Ainsi, la réécriture architecturale des projets alliée à l'utilisation massive des fibres végétales (bois, paille) peut engendrer une séquestration importante du CO_2 (106 kg par m^2) [LRA/GRECAU logiciel Cocon, FDES, EcoInvent In RFCP].

Une étude spécifique animée par l'Institut (FCBA) [Malsot et al, 2005] a montré que la filière « -bois construction- » représente un fort potentiel de variation annuelle des stocks avec 195 millions de tonnes de CO_2 séquestrées en 1998. Parmi les cinq études menées, seule celle relative au bois de construction a été considérée comme présentant un potentiel de stockage de longue durée. L'étude a conclu qu'une politique volontariste est cruciale pour que le bois construction contribue significativement à l'achèvement des engagements de réduction des émissions nettes de CO_2 en France.

Le premier travail de l'observatoire économique créé en 2008 par France Bois Forêt (FBF) concerne le recensement, sur l'année 2011, des constructions bois au niveau national. L'objectif principal était d'estimer la part de la construction bois dans les différents marchés de la construction neuve en France (maisons individuelles, logements collectifs, opérations d'extension - surélévation, bâtiments tertiaires publics et privés). L'enquête confirme le bon développement de la construction bois qui bénéficie à l'ensemble de la filière en amont et en

* La construction bois désigne toutes les techniques constructives à base de bois permettant de réaliser un bâtiment neuf (résidentiel et non résidentiel) : celles-ci sont l'ossature bois, le système poteau - poutre, les panneaux massifs contrecollés ou contrecloués, le colombage traditionnel et le bois massif empilé. Les travaux d'isolation thermique par l'extérieur ainsi que ceux de charpente ne sont pas pris en compte dans cette définition.

aval. Plus de 11% des maisons individuelles (en secteur diffus) sont en bois, et près de 20% des agrandissements, le tout avec des bois majoritairement certifiés (77%) et, pour un peu plus de la moitié, provenant de forêts françaises et transformés par un tissu d'entreprises locales. Cette étude a été réalisée par la Cellule Economique de Bretagne, pour le compte de FBF, auprès de 945 entreprises de la construction bois en France. L'étude affirme que plus d'une maison sur 10 construite en France est en bois [Toppan, FBF, 2012].

Le système « ossature bois » est le plus concerné par l'évolution tant qualitative que quantitative. Il occupe aujourd'hui (et pour les années à venir) les 3/4 du marché de la construction bois. L'isolation thermique est le principal atout concurrentiel des enveloppes à ossature bois au moment de l'entrée en vigueur de la RT 2012. Notant que pour une épaisseur réduite, les performances thermiques peuvent être très élevées, et ce, grâce à l'isolant présent entre montants mais aussi aux doublages intérieurs ou extérieurs en couches croisées qui viennent achever la rupture des ponts thermiques dans ces enveloppes [Boulet, FCBA, 2012].

La construction en bottes de paille est également en plein renouveau en raison de son intérêt environnemental, économique et technique. Mais l'absence de référentiel théorique, de formation, technique et réglementaire, freine la diffusion de ce mode constructif. Une expérimentation, avec le soutien de la FFB et de l'ADEME a été réalisée à Montholier dans le Jura (Figure I-1). Elle a permis de disposer des premières données chiffrées sur la paille utilisée comme matériau d'isolation dans la construction. Elle porte principalement sur les performances thermiques, hygrothermiques du matériau paille ainsi que sur la résistance à l'arrachement des enduits appliqués sur la paille.



Figure I-1 : Exemples de projets en bois en France

En Algérie, le manque d'expérience dans la construction bois impacte la compétitivité du matériau. Ce dernier n'est quasiment pas utilisé, avec une absence d'information sur sa durabilité et sa performance dans l'enveloppe du bâtiment. La connaissance de son comportement hygrothermique transitoire manquait encore des valeurs de référence. Le pays dispose pourtant d'une ressource forestière non marginale, les forêts et maquis couvrent 3,7

millions d'hectares. La principale essence est le pin d'Alep. Les superficies à destination de production de bois d'œuvre et de trituration s'estiment à 1 038 000 ha (le chêne liège non inclut) avec une disponibilité annuelle de l'ordre de 750 000 m³/an. L'exploitation de la moitié de la disponibilité en chêne Zeen, estimée à 120 000 m³/an, serait susceptible de fournir de l'ordre de 20 à 30.000 m³ de bois d'œuvre par an [Zerizer et al, 2006]. Un programme de plantation à potentiel productif important à base d'essence à croissance rapide a été mis en place.



Figure I-2 : Exemples de forêts algériennes

De plus, le secteur de l'habitat en Algérie est en pleine explosion (croissance démographique). Il doit répondre aux attentes de préservation de l'environnement et à des enjeux économiques et sociologiques. Les maisons à base de bois, en plus des atouts économique et environnemental, s'adaptent à tous types de terrains et de climats. Il est donc nécessaire de développer les recherches sur les enveloppes à base de bois pour encourager l'utilisation de ce matériau naturel.

2. La construction en matériaux hygroscopiques en Algérie

Les chalets et les maisonnettes à ossature bois ont fait leur entrée dans la production de l'habitat en Algérie. Une vingtaine de milliers ont été installées pour le relogement des sinistrés du séisme de Boumerdes (12 mai 2003). On cite également la présence de quelques chalets et maisonnettes en bois dans les régions montagneuses : Chrèa, Tikijda, Séraïdi, Chétaïbi, etc.

En climats chauds de Biskra, Oued Souf, Ghardaia, Timimoun, Adrar, on trouve surtout les enveloppes utilisant les fibres végétales (la paille, herbes) mélangées à la terre crue avec un revêtement en chaux et plâtre (Figure I-3).



Figure I-3 : Maison en terre (mélangée aux herbes) à Ghardaia

A Ghardaia et dans d'autres régions du sud algérien, il est traditionnellement utilisé les vieux palmiers dans la construction des maisons en terre. Cette utilisation se manifeste par la présence de troncs au niveau de la structure (poteau - poutre), des feuilles et la base des pétioles (kornaf) en plancher (Figure I-4).



Figure I-4 : Utilisation du palmier (tronc et feuilles) dans la construction à Ghardaia

2-1. Le devenu de l'architecture en terre en Algérie

« La terre », matériau hygroscopique écologique, est disponible in situ. Tout le sud algérien autrefois était construit avec ce matériau. Les ksours et les kasbas de Taghit, de Timimoun, ou d'Adrar dans le sud-ouest algérien confirment un engagement durable en faveur d'une renaissance de la construction en terre crue pour l'habitat, et de la conservation des patrimoines architecturaux. Mais, laissées à l'abandon, ces majestueuses forteresses de terre rouge ou ocre sont menacées par les intempéries et tombent en ruine, au risque de disparaître à jamais du paysage et du patrimoine mondial. Construire en terre aujourd'hui, en Algérie présente un signe de précarité pour les habitants. Le béton ou le parpaing a malheureusement remplacé la terre (Figure I-5). C'est un patrimoine qui se perd peu à peu. A présent, la problématique environnementale nous amène à porter un nouveau regard sur ce type d'architecture qui abrite encore entre la moitié et les deux tiers de la population du globe [Zerhouni, Guillaud, 2001].



Figure I-5 : Etat des maisons en terre en Algérie

2-2. Les matériaux plâtre, chaux

Le plâtre et la chaux ont aussi fait leurs preuves depuis des siècles dans la construction grâce à leur adaptation à l'environnement et au climat saharien algérien. La main d'œuvre plus adaptée, tant au niveau de la construction que de l'entretien, a assuré la transmission du savoir-faire de ces matériaux et de leur utilisation (Figure I-6).



Figure I-6 : L'utilisation du plâtre et du mortier de chaux dans la construction à Ghardaia

A vrai dire, la valorisation des matériaux avec les savoir-faire locaux permettent de relancer l'économie du pays. La participation de la population dans le processus de fabrication des matériaux comme la chaux et le plâtre (cas de la ville de Ghardaia) présente un enjeu durable. Malheureusement, de nos jours, ce travail des matériaux a été complètement abandonné dans le reste des villes algériennes. Les prototypes préétablis et les matériaux industrialisés, non adaptés aux climats locaux, ont envahi le marché de l'habitat.

2-3. La pierre

La pierre, matériau naturel, est omniprésente dans le patrimoine algérien dans les casbahs «pentagones» de Ghardaia de Beni Yezguen, El Atteuf et surtout dans l'architecture datant de l'époque coloniale (Figure I-7). Celle, d'origine calcaire, est la plus utilisée en maçonnerie, soit comme pierre de taille dont l'appareillage concerne toute l'épaisseur du mur et qu'on trouve dans les bâtiments administratifs de la ville, soit dans un type de maçonnerie dans laquelle seuls les parements sont appareillés tandis que le cœur du mur est constitué par un béton dit fourrure, ou encore en murs en maçonnerie ordinaire, les plus couramment utilisés dans la construction des maisons (exemple de la pierre « travertin » à Guelma).



Figure I-7 : Exemples d'architecture en pierre en Algérie

3. Comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques :

La caractérisation du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques se différencie selon trois échelles [C&B, 2012] :

- Échelle Matériau ;
- Échelle Système ou Composant ;
- Échelle Bâtiment.

Au niveau du matériau, on mesure les coefficients intrinsèques (porosité, conductivité thermique, isotherme de sorption, diffusion hydrique, valeur de la capacité tampon hydrique, etc.). A ce niveau aussi et concernant la modélisation, des modèles mathématiques permettent d'interpréter le transfert couplé de chaleur et d'humidité au sein des matériaux. Dans le domaine hygroscopique, ces équations de transfert émanent principalement des relations analogues aux équations de Fourier ou de Fick présentées ultérieurement.

A l'échelle de l'enveloppe du bâtiment (systèmes de mur, toits, etc.), le transfert s'observe par la variation de la température et de l'humidité à la surface et au sein du composant lors de la variation hygrothermique de l'ambiance. Enfin, à l'échelle Bâtiment, on évalue le confort hygrothermique et la consommation énergétique. Certaines simulations au niveau de cette échelle et celle du composant sont réalisées à partir des modèles mathématiques établis à l'échelle matériau auxquels on ajoute les conditions aux limites (échelle de la paroi) qui décrivent en détails un modèle physique au niveau d'un bâtiment. Des logiciels spécialisés sont développés dans cette optique (Wufi, hygIRC, DELPHIN, MOIST,...)

3-1. Caractérisation hygrothermique des enveloppes à base de matériaux biosourcés

Suite au Grenelle de l'environnement, les matériaux biosourcés prennent une place de plus en plus importante avec, pour objectif, d'atteindre 10% de matériaux biosourcés utilisés dans le bâtiment, hors bois d'œuvre, et ce à l'horizon 2020.

Plusieurs études ont eu pour objectif principal de connaître et d'analyser le comportement thermo hydrique et les performances énergétiques des enveloppes en bois en situations réelles [Pickett, 2003], [Raji, 2006], [Piot, 2009], [transbatibois, 2011], [Rafidiarison, 2012].

3-1-1. Enveloppes en bois massif

3-1-1-1. Etudes à l'échelle du matériau

Dans le projet Transbatibois (Transferts dans les parois des Bâtiments Bois) mené par le CRITT bois, le LERMAB, le LEMTA et par des constructeurs spécialistes du bâtiment, une caractérisation des matériaux de construction des maisons en bois a été réalisée. Les principaux

paramètres impliqués dans les transferts de chaleur et de masse ont été mesurés. Les caractéristiques telles que les isothermes de sorption, les coefficients de diffusion, la conductivité thermique apparente et sa dépendance avec l'humidité ont été déterminées. La thermo-diffusion a également été décrite.

3-1-1-2. Etudes à l'échelle du composant

RAJI, (2006) a détaillé les caractéristiques des transferts thermo hydriques des parois formées de madriers «Bois Massif contre-collé verticalement». Il a testé, en particulier, l'effet du joint de colle sur les propriétés hydriques du madrier ainsi que l'effet des joints feutrinés entre madriers sur la perméabilité totale du mur. L'étude a révélé que le joint de colle présente une résistance hydrique aux transferts de vapeur d'eau en régime stationnaire, mais moins marquée en régime variable. Le joint de feutrine entre madriers ralentit fortement le passage de l'air dans le bois sous l'influence d'une différence de pression.

3-1-1-3. Etudes à l'échelle du bâtiment

Une campagne de mesure sur 20 maisons en bois massif a montré un niveau de confort hygrothermique très satisfaisant l'hiver comme l'été. Aussi, la consommation mesurée pour le chauffage de ces maisons a été en moyenne 15% inférieure à celle définie par la RT2000. Il a été constaté que le confort thermique et la consommation énergétique dans les maisons en bois massif sont mal pris en compte dans les calculs thermiques usuels [Raji, 2006].

Il a également été montré, par l'expérience et suivant les résultats d'une étude nord-américaine [Pickett, 2003], que l'efficacité énergétique d'une maison en bois massif d'épaisseur 17 cm est égale ou dépasse celle d'une maison à ossature bois d'épaisseur 27 cm. Les conclusions ont complété que les maisons en bois massif étaient aussi performantes que les maisons dites conventionnelles, même avec une valeur de résistance thermique supérieure de 44% à celle des systèmes constructifs conventionnels. L'étude a confirmé qu'en pratique et sur la base des besoins énergétiques annuels de chauffage et de climatisation, les maisons en bois massif permettent d'améliorer les performances de 2,5% à plus de 15% en comparaison avec une maison à ossature bois de niveau identique.

Par ailleurs, le projet Transbatibois a visé à bien évaluer les performances hygro-thermiques des maisons bois en divers types constructifs : ossature, rondins, madriers, panneaux. Les propriétés du bois massif, vis-à-vis des transferts d'humidité, ont été mises en avant.

3-1-2. Enveloppes à ossature bois

3-1-2-1. Etude à l'échelle du composant : système enveloppe

Pour l'étude du comportement thermo hydrique d'une enveloppe à ossature bois [Piot, 2009, 2011], il est utilisé une cellule-test de dimensions représentatives d'une salle de séjour construite sur une plate-forme d'exposition en extérieur à Grenoble. Plusieurs configurations ont été testées : parois avec et sans pare-vapeur ; climat interne avec ou sans chauffage, humidification ou ventilation. En parallèle, un modèle numérique de la cellule a été développé, basé sur le modèle existant HAM-tools. Sa validation s'est faite par étapes (paroi seule, puis couplée avec la zone, prise en compte du bardage). L'étude a notamment permis de mettre en évidence l'effet de sollicitations thermiques sur le comportement hydrique d'une paroi comportant un matériau hygroscopique et a montré la capacité du modèle développé à le décrire.

Au sujet des enveloppes performantes, et afin d'améliorer l'efficacité énergétique et le confort thermique des maisons à ossature bois, une comparaison de différents murs pariéto-dynamiques (MPD) a été réalisée. Le principe était de préchauffer l'air de ventilation en utilisant les murs d'une maison à ossature bois. Les résultats ont montré qu'il est possible de se limiter à l'orientation sud de la maison sans trop réduire le gain énergétique. Dans ce cas, la solution à deux lames d'air s'est avérée la plus intéressante du fait notamment de la réduction des déperditions à travers le MPD. Il a été également démontré qu'il faut s'orienter vers un capteur vitré intégré en façade couplé à un mur interne inerte présentant une lame d'air ventilée. L'avantage est de préchauffer une seconde fois (après le capteur) grâce à l'inertie du mur l'air neuf de ventilation en hiver. En été, le confort est amélioré grâce à l'inertie de la paroi et à son refroidissement (surventilation nocturne) [Fraisie, et al, 2006].

3-1-2-2. Etude à l'échelle du bâtiment

Kalamees et al (2009) ont réalisé une large campagne expérimentale sur 170 maisons individuelles occupées en Finlande, dont plusieurs à ossature bois et d'autres en bois massif. Le but était de vérifier les effets du système de ventilation et des propriétés du tampon hydrique du système constructif sur la stabilité de la température et de l'humidité intérieure. Les résultats n'ont pas montré de réelles différences en termes de variations d'humidité mesurée dans le cas d'un parement hygroscopique ou non. On a constaté que l'effet du système constructif sur l'humidité intérieure n'est pas aussi important que prévu. Par contre, la ventilation a plus d'effet sur le climat intérieur que sur les propriétés du système de construction. Les auteurs ont conclu

que la masse hygroscopique des meubles, des textiles, etc. est probablement un facteur qui joue un rôle significatif dans l'équilibre hydrique du volume intérieur.

3-1-3. Enveloppes bois en parois multicouches

3-1-3-1. Etude à l'échelle composant : système paroi

Des compositions de parois, avec une complexité croissante, ont été employées pour faciliter l'analyse des transferts couplés dans les parois en bois multicouches (bois massif - fibres de bois rigide - pare-pluie, bois massif - fibres de bois rigide - bois massif, etc.). Les confrontations entre mesures et simulations avec le code de calcul BuildingPore ont montré l'importance à prendre en compte l'hystérésis de l'isotherme de sorption et sa dépendance à la température. Les profils d'humidité calculés étaient d'ailleurs plus proches des observations expérimentales comparés aux profils obtenus par le logiciel WUFI [Rafidiarison, 2012].

3-1-3-2. Etude à l'échelle du composant : système enveloppe

Plusieurs cellules-test de géométries simples, développées sur la base de différents systèmes constructifs bois, ont été testées avec un suivi en extérieur sur le site expérimental de Nancy. Les mesures réalisées ont montré que les caractéristiques hygrothermiques du volume d'air intérieur, en réponse aux productions internes, dépendent du type de parement intérieur mais également de la dynamique des transferts de chaleur et de masse à l'intérieur des parois. Par ailleurs, le comportement hygroscopique des matériaux a permis d'atténuer les augmentations d'humidité interne des parois et de limiter les risques de condensation ou de développement de moisissures [Rafidiarison, 2012].

Enfin, un projet ANR nommé HYGRO-BAT (2011 – 2014) a eu pour objectif l'élaboration d'une méthodologie de conception hygrothermique des bâtiments. La démarche adoptée a consisté à fiabiliser les outils numériques existants en menant une approche « benchmark » expérimentale et numérique [Woloszyn et al, 2014].

3-1-4. L'utilisation de troncs de palmier

A l'échelle du matériau, une étude menée au Nigeria a prouvé que le tronc de cocotier peut être utilisé comme isolant thermique dans le bâtiment. Comparé à d'autres matériaux de construction et isolants à base de bois, le tronc de cocotier est de conductivité inférieure, de haute résistivité et de haute résistance thermique spécifique [Ajibola, Onabanjo, 1995].

Par ailleurs, une recherche expérimentale sur les propriétés thermophysiques, chimiques et diélectriques de trois variétés de bois de palmier dattier d'oasis de Biskra en Algérie, a été menée. Le but de l'étude était d'utiliser ce matériau naturel dans la fabrication des isolants thermiques du bâtiment [Agoudjil et al, 2011]. Les résultats ont montré qu'il n'y a aucun effet d'orientation des fibres sur la conductivité thermique et un faible effet sur la diffusivité thermique pour les deux échantillons. On a aussi remarqué qu'il y a plus de parois de fibres à croiser dans la direction transversale, et par conséquent plus de résistance au flux de chaleur. Le bois de palmier dattier a été identifié comme un bon candidat pour le développement d'isolants efficaces et sûrs.

3-1-5. Comportement thermo hydrique des bétons végétaux

A l'échelle du composant, de nombreux travaux ont été effectués sur les bétons végétaux. Le béton de chanvre est le matériau le plus documenté concernant le comportement thermo hydrique. Dans ses travaux de recherche, Samri, (2008) a mis en évidence les phénomènes d'évapo - condensation de l'eau au sein d'un mur en béton de chanvre soumis à des gradients de température. Il a montré combien l'aspect poreux influence fortement les échanges d'eau sous forme vapeur et liquide au sein du matériau. Lors d'une montée en température de 10 à 40°C dans l'enceinte représentant les conditions climatiques extérieures, une augmentation de la pression de vapeur a été constatée au sein du mur traduisant un phénomène d'évaporation. Ce dernier s'est accompagné d'une absorption de chaleur permettant d'amortir les variations de température au sein du mur. Il a constaté que ces phénomènes restent très limités dans le cas de matériaux terre cuite ou béton cellulaire et en conséquence, n'influencent pas de manière significative les transferts thermiques. Samri a également remarqué que la présence d'enduits modifiait les transferts de vapeur d'eau et qu'ils agissaient comme un filtre hydrique.

Les mêmes phénomènes ont été également constatés par Collet et al (2011) au sein d'une paroi en béton de chanvre de 30 cm. Il a été montré que la diffusion de vapeur se produisait de façon homogène dans toute l'épaisseur du matériau et que l'ossature ne perturbait pas le comportement hygrothermique de la paroi. Celle-ci ne constitue pas un pont thermique du fait des conductivités thermiques équivalentes du bois et du béton de chanvre.

Dans une étude plus récente, collet et al (2013) ont comparé le comportement hygroscopique de trois bétons de chanvre utilisés dans les murs pour identifier si la composition et la fabrication ont un impact sur les propriétés hydriques. Les investigations ont été basées sur la mesure de l'isotherme de sorption, la perméabilité à la vapeur d'eau en fonction de l'humidité

et la valeur du tampon hydrique. Les résultats ont souligné que les capacités du transfert et du stockage de ces matériaux sont élevées. Ils sont classifiés en tant qu'excellents (ou presque excellents) régulateurs hydriques.

Ait Oumeziane, (2012) a réalisé des comparaisons entre simulations et expériences sur une paroi en béton de chanvre. Les expériences ont été menées dans une enceinte bi-climatique avec, comme conditions initiales, 40% HR et 23°C. Les simulations ont été fondées sur un modèle numérique unidimensionnel de transfert de chaleur et de masse basé sur les travaux de Kunzel prenant en compte l'hystérésis de sorption et le transfert d'air. Ait Oumeziane a montré que l'intégration d'un modèle d'hystérésis et la prise en compte de l'histoire hydrique du matériau sont des paramètres essentiels pour caractériser le comportement hydrique réel du béton de chanvre. Aussi, l'application d'un enduit chanvre/chaux, sur la paroi en béton de chanvre, a accentué sa participation dans l'effet tampon hydrique. Enfin, les différences remarquées entre résultats expérimentaux et simulés en situation non isotherme ont montré que la température a une influence sur le stockage et la cinétique de stockage du matériau.

Evrard et De Herde, (2009) ont étudié, par simulation avec le logiciel WUFI, les réponses hygrothermiques de différents systèmes de mur soumis à des variations de température et ont évalué différentes grandeurs permettant de caractériser ces réponses. Les résultats ont mis en évidence, pour les bétons de chanvre et les briques d'argile, des déphasages respectifs de 15 h et 12 h et des amortissements thermiques élevés de l'ordre de 92 et 95%. Le mur en brique d'argile a une meilleure inertie thermique alors que les murs en béton de chanvre ont présenté les meilleures capacités de tampon hydrique : 2,11 g/m² % RH contre 0,96 à 1,01g/m² % RH pour la brique d'argile. Evrard, (2008) a noté que le changement de phase de l'eau s'accompagne de dégagement ou d'absorption d'énergie. Il a calculé que les murs en béton de chanvre pouvaient dégager une énergie de 43Wh/m² durant la nuit contre 14,1 à 24,6 Wh/m² pour les murs en brique d'argile.

Par ailleurs, pour tester le comportement du béton de chanvre sous un climat froid et humide, De Bruijn et Johansson, (2013) ont étudié la fixation de l'humidité et les propriétés thermiques du matériau. Les résultats ont montré qu'à humidité relative élevée, la conductivité thermique était plus élevée. Par conséquent, le béton de chanvre serait moins avantageux en climat humide qu'en climat sec en termes de conductivité. Une plus grande quantité de chanvre dans le mélange testé a fourni des propriétés thermiques plus prometteuses avec une conductivité thermique inférieure et une faible chaleur spécifique. Ainsi, s'il s'agit d'un bâtiment en chanvre

et chaux sous climat froid et humide, un béton de chanvre avec plus de chanvre dans le mélange serait donc plus approprié du point de vue hygrothermique.

Egalement, une simulation du comportement hygrothermique d'une cellule en béton de chanvre a été réalisée par Tran Le et al (2010). Un modèle physique unidimensionnel a été implémenté dans l'environnement de SPARK en utilisant la technique de différence finie avec un arrangement implicite. Les résultats numériques ont été comparés aux données expérimentales fournies par l'annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie « AIE ». Il a été constaté que la capacité d'absorption d'humidité du béton de chanvre modère la variation de l'humidité intérieure. Une analyse de sensibilité a été également effectuée. Elle a prouvé que la performance hygrothermique de l'enveloppe est très sensible aux taux de renouvellement d'air et aux propriétés physiques de l'enduit du mur ou de la couche externe.

En outre, le comportement du béton de chanvre a été comparé à celui du béton cellulaire. Ainsi, une réduction de 45% de la consommation d'énergie peut être atteinte dans le cas du béton de chanvre. Enfin, différentes stratégies de ventilation ont été comparées. On a constaté que l'utilisation d'une stratégie de ventilation hygroréglable avec le béton de chanvre peut réduire la consommation d'énergie d'environ 15%.

Concernant le béton de bois, très peu de travaux ont été effectués sur son comportement thermo hydrique. L'étude de Becchio et al (2009) s'est concentrée sur la possibilité de constituer un béton léger plus durable, béton de bois minéralisé (MWC), en substituant les agrégats naturels par des déchets issus de la filière bois. Dans ce travail, les effets de l'addition des agrégats de bois sur les propriétés mécaniques et thermiques du béton ont été vérifiés. Un modèle unidimensionnel de flux de chaleur a été utilisé pour estimer la conductivité thermique du MWC. Néanmoins, les transferts hydriques n'ont pas été abordés. Selon l'étude, l'utilisation de MWC peut compétitivement répondre à la demande d'une enveloppe bien isolée et concurremment caractérisée par la masse thermique élevée. En conséquence, les applications du béton de bois dans des constructions de bâtiments peuvent être une solution intéressante afin d'améliorer l'efficacité énergétique et la durabilité des bâtiments.

Les travaux de Taoukil et al (2013) n'ont pas concerné la caractérisation thermo hydrique mais l'influence de l'humidité sur les propriétés thermiques (conductivité et diffusivité) du composé bois-béton. Les copeaux de bois ont été incorporés à un mélange de sable-ciment. Cinq formulations (à pourcentage différent de copeaux) ont été examinées. Les résultats expérimentaux ont démontré que l'allégement du béton par les copeaux de bois augmente la

capacité d'isolation thermique en diminuant la conductivité thermique et la diffusivité. Les auteurs ont précisé qu'il est nécessaire de traiter les copeaux de bois vis-à-vis de leur sensibilité à l'eau (problème d'hydratation du ciment). Un traitement par thermo-huilage a été évoqué comme ça a été aussi suggéré dans l'étude de Bederina et al, (2012).

3-1-6. Enveloppes en paille

3-1-6-1. Etudes à l'échelle du composant (Système de mur)

Wihan (2007), dans sa thèse, a suivi le monitoring de deux maisons construites en paille ; la première en Brittany (France) et l'autre en Blanden (Belgique). Les mesures ont été comparées à des simulations réalisées sous Wufi. Le mur en paille (enduit de terre sur ses deux faces) simulé in situ a présenté les mêmes tendances et valeurs que celles mesurées. Wihan a noté que parmi toutes les propriétés du matériau, la résistivité thermique influence significativement le transfert d'humidité. L'étude a conclu que, même si l'infiltration d'air et la convection du flux d'air ne sont pas pris en compte en modélisation, les résultats sont assez satisfaisants et correspondent bien à la réalité.

3-1-6-2. Etude à l'échelle du bâtiment

L'étude, menée par Ashour et al (2011(a)), avait pour objectif d'évaluer une maison en ballot de paille située en Bavière (Allemagne). Le suivi de la température et de l'humidité relative a été effectué au sein des murs de paille et à l'intérieur de la maison. Les résultats ont dévoilé que la température intérieure est restée stable comparée à la température extérieure. Les murs de paille ont atténué les crêtes extrêmes de la température extérieure. L'étude a notamment révélé que les températures au sein du mur en paille (à 10 et à 20 cm de l'extérieur) étaient souvent supérieures à la température de l'enduit plâtre. Ceci a été attribué au plâtre extérieur qui est influencé par les conditions externes et son isolation thermique inférieure, comparé à la paille. L'humidité relative mesurée au sein du mur est également restée stable malgré la forte variation de l'humidité relative extérieure. Ashour et al (2011(a)) ont aussi remarqué que le transfert d'humidité dans ces murs en ballots de paille était lent.

Dans une autre étude, Ashour et al (2011(b)) se sont concentrés sur la détermination de la teneur en humidité d'équilibre des matériaux naturels de revêtement des bâtiments en ballot de paille. Des revêtements en terre de quatre compositions différentes de sol cohérent et de sable combinés avec renforcement de trois types de fibre naturelle, paille de blé, paille d'orge et divers

copeaux de bois, ont été étudiés. Les résultats d'essai ont démontré que l'effet de l'humidité relative sur le changement du taux d'humidité est plus prononcé que celui de la température. L'humidité interne du matériau terre, quel que soit la nature des fibres de renforcement était dans la gamme de 0,6 à 1,7 %. L'humidité était inférieure à 7% pour tous les matériaux, ce qui montre pourquoi les revêtements de terre sont utiles pour les bâtiments de ballots de paille pour la protection des murs contre les conditions climatiques humides extrêmes.

3-2. Comportement thermo hydrique des enveloppes en terre

Des études sur les propriétés thermophysiques et hygroscopiques, sous l'optique de la performance du matériau « terre » dans l'isolation thermique, ont été menées sous différents climats. Diverses recherches ont investigué les propriétés hygrothermiques des argiles crues et montré leur potentiel d'amortissement passif des fluctuations d'humidité relative dans les applications bâtiment [Padfield, 1998], [Allinson, Hall, 2010]. Les enveloppes d'argile réduisent la fréquence des périodes de forte humidité à la surface de paroi, avec le potentiel de réduire la consommation d'énergie [Allinson, Hall, 2010].

Dans le but de promouvoir un habitat adapté au climat aride et semi-aride du sud algérien, une simulation a été effectuée via TRNSYS sur trois maisons : traditionnelle (terre), moderne (parpaing creux) et un prototype bioclimatique (en parpaing plein de béton sur trois côtés : est, ouest et nord et en pierre tendre, côté sud). La maison traditionnelle (en terre) reste de loin la plus efficace pour pallier le problème de surchauffe, ce qui prouve que l'inertie thermique-hydrique de ce matériau joue un rôle primordial en été [Ould-Henia, 2003].

Sous le climat méditerranéen de Bari (Palese en Italie), une simulation numérique d'une cellule-test via le logiciel WUFI plus a été menée afin de comparer le comportement hygrothermique d'un enduit interne composé d'argile (bentonite) avec celui en gypse et le plâtre acrylique de stuc [Liuzzi et al, 2013]. Pour le scénario inconditionné, l'enduit d'argile a pu maintenir une humidité constante en comparaison des enduits acryliques de stuc et de gypse. Dans le scénario conditionné, l'enduit d'argile a fourni la meilleure performance hydrique en termes d'amortissement d'humidité avec une réduction annuelle de consommation de 25% pour l'humidification et de 40% pour la déshumidification. Les auteurs ont conclu qu'il est clair qu'un composé d'argile, en tant qu'enduit interne en climat méditerranéen fournit une amélioration significative au niveau du confort intérieur combiné à des économies d'énergie opérationnelles.

Sous le climat chaud du Cameroun, les briques de terre stabilisées (avec incorporation de sciure de bois) ont montré les meilleurs résultats comparées aux briques de terre stabilisées avec de la pouzzolane ou aux briques de terre comprimée. Les briques de terre stabilisées avec la sciure de bois ont également montré une meilleure amélioration de la résistance à la compression, puisque la présence des fibres de bois renforce les propriétés mécaniques des briques [Meukam, 2004].

D'autre part, l'effet des matériaux locaux utilisés pour l'isolation du toit sur les charges de climatisation a été pareillement évalué sous le climat chaud tropical sec de Ouagadougou. Les simulations via TRNSYS ont indiqué que le mur d'argile-paille induit des consommations d'énergie inférieure de 8% comparé à un mur standard d'argile. Aussi, l'ajout d'isolants seulement de 1,5 cm d'épaisseur de bois rouge, et de deux panneaux (faits de fibre et de mélange de chaux-ciment) a induit respectivement une économie de 6,2% et 12,1% en termes de charges de climatisation. La consommation d'énergie a été encore réduite jusqu'à 18,4% avec l'inclusion de paille combinée avec ces isolants de panneaux de fibre comparée à la maison de référence avec des murs faits d'argile pure [Toguyeni, et al, 2012].

En climat océanique de Rennes, les murs en torchis d'orientation sud et sans occultation comparés par simulation via TRNSYS aux murs en pierre et ceux en béton ont montré un comportement thermique satisfaisant. Un mur de torchis de 50 cm d'épaisseur a plus au moins le même comportement thermique que celui d'un mur en béton de bloc isolé avec 7 à 9 cm d'isolation. Le mur de terre avec isolation, peut faire face à n'importe quelle orientation et être encore conforme à la réglementation. En orientation sud avec 5 cm d'isolation ; il a le même comportement qu'un mur en béton de bloc isolé avec 15 cm d'isolation ce qui est dû à sa haute absorptivité solaire. Le « torchis » a été jugé respectueux de l'environnement puisqu'il est disponible, naturel et peut totalement être recyclé [Collet et al, 2006].

Dans cette optique, les travaux de Oti et al, (2009) rajoutent qu'en raison de sa simplicité et son faible coût, de ses bonnes propriétés thermiques /acoustiques et à la fin de cycle de vie du bâtiment, le matériau d'argile peut être facilement recyclé ou retourné vers le sol sans aucune interaction avec l'environnement. Le profil environnemental des briques d'argile crue a été estimé excellent par rapport aux briques cuites, et ce, au regard du processus de production qui est très énergivore pour ces dernières. L'énergie utilisée dans les maisons en pisé comparée à une maison typique en béton est diminuée de plus de 240% et l'impact du transport de 640% [Morel et al, 2001].

En climat froid de l'Angleterre, l'adjonction de copeaux de bois aux murs de terre a permis d'atteindre des performances compatibles avec la réglementation thermique courante. Des mesures sur les briques d'argile crue et des mélanges d'argile de paille à l'aide d'une technique de sonde innovante ont été effectuées [Goodhew, Griffiths, 2005], mais en occultant la question de l'humidité.

Par ailleurs, quatre murs en terre stabilisée ont été testés à l'aide d'une chambre climatique pour évaluer les phénomènes tels que la pénétration d'eau d'aspersion sous l'effet de gradient de pression statique, la migration par diffusion et la condensation interne/interstitielle. Aucune augmentation significative de l'humidité relative ou condensation à l'intérieur des murs n'a été détectée. Cette observation s'est appliquée à des différentiels de température et des niveaux élevés d'humidité [Hall, 2007].

3-3. Caractérisation thermo hydrique du matériau plâtre et ses dérivés

Le matériau plâtre et ses dérivés comme le gypse ont largement été expérimentés du fait de leur réponse hydrique rapide, comparés à d'autres matériaux. Dans le cas du plâtre, une atténuation de 20% d'humidité relative intérieure a été enregistrée [Kunzel et al, 2005].

Egalement des tests sur plaques de plâtre et sur le silicate de calcium ont été réalisés par Kwiatkowski, (2009). La réponse des échantillons à une variation type « échelon » d'humidité relative à température constante a été étudiée. Aussi, l'effet de deux revêtements de surface - le papier peint et la peinture microporeuse - a été caractérisé. Enfin, l'adsorption (variation de masse de l'échantillon) a été discutée en fonction de différents matériaux support, de revêtement, de température ambiante et de mouvement d'air dans l'enceinte climatique. Il a été souligné que la quantité d'eau adsorbée est plus forte pour la plaque de plâtre que pour le silicate de calcium. La peinture réduit clairement le taux du transfert alors que le papier peint augmente la quantité d'humidité accumulée. A température ambiante élevée, la prise de masse totale et le taux de transfert sont plus forts qu'à basse température.

Cerolini et al (2009) ont évalué l'inertie hygroscopique d'autres matériaux fortement absorbants comparés aux matériaux de construction communs tels que le gypse et la perlite. Des échantillons de polyacrylate de sodium à base de cellulose ont présenté des valeurs de MBV respectivement neuf et trois fois plus haute que celles mesurées le gypse et la perlite. Selon la classification pratique de MBV proposée par le projet de NORDTEST [Rode, 2005], les deux matériaux, fortement absorbants, seraient classifiés en tant qu'« excellents » amortisseurs d'humidité.

3-4. Comportement thermo hydrique des enveloppes en pierre

D'après les recherches effectuées dans le cadre de cette thèse, aucune étude n'a été discernée abordant la caractérisation multi-échelle des enveloppes en pierre. Les études de [Medjelekh, 2006, 2008, 2010] ont concerné le monitoring et la simulation par TRNSYS d'une maison construite en pierre sous le climat chaud subhumide de Guelma (Algérie). Les études ont été menées dans le but de vérifier l'impact de l'inertie thermique de l'enveloppe sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment.

4. Etudes portant sur les effets de l'humidité dans les bâtiments

Le niveau de l'humidité relative intérieure est le résultat de l'équilibre hydrique intérieur. Il est influencé par plusieurs facteurs, tels que les sources d'humidité (occupation, végétation), ventilation (débit d'air, taux d'humidité d'air extérieur), l'humidité traversant l'enveloppe du bâtiment, la condensation aussi bien que possible, l'échange d'humidité entre les matériaux hygrosopiques et l'air.

4-1. Effet sur le confort des occupants et la durabilité des bâtiments

La norme ASHRAE 55-92 [ASHRAE, 1992] a prescrit une humidité intérieure de limite inférieure de **4.5 g/kg**, équivalente à **30 %** de HR à **20.5 °C**. La norme 55-2004 a recommandé une gamme d'humidité relative de **30 à 60 %** pour une température entre **20 et 26 °C** [ASHRAE, 2010].

Il a été démontré que l'humidité, si elle est élevée, affecte le confort thermique et respiratoire [Toftum et al, 1998 (1), l'hydratation de la peau [Toftum et al, 1998 (2)] et la qualité de l'air intérieure perçue [Fang et al, 1998]. Les sujets ont rapporté d'être plus fatigués à 70% de HR. Or des effets positifs sur l'agrément subjectif ont été trouvés en condition transitoire en air à basse humidité, dus à plus d'évaporation du corps humain. On tend à ressentir l'air plus propre en basse humidité qu'en humidité élevée (Tsutsumi 2007). En outre, l'humidité affecte les charges de conduction sensibles et latentes [Mendes et al, 2003] et peut causer des détériorations dans les bâtiments [Lucas et al, 2002]. Les niveaux élevés d'humidité relative accélèrent la croissance de moisissures (problèmes d'irritation des muqueuses et allergies pulmonaires) [Deoux, 2004]. Ils sont les causes déterminantes de rhinite et de ses sous-catégories d'après les résultats de méta-analyse proposés par Jaakkola et al, (2013). Selon Sedlbauer (2001), le risque de formation de moisissures augmente considérablement lorsque l'humidité relative dans une pièce va au-delà de 80% plusieurs fois par semaine.

Les niveaux inférieurs d'humidité relative peuvent provoquer les décharges électrostatiques ($HR < 20-30\%$) [Paasi et al, 2001], causer le séchage de la peau et l'irritation des yeux. Les études épidémiologiques, cliniques et en chambre climatique indiquent qu'une humidité relative environ 40% est meilleure pour les yeux et les voies respiratoires supérieures que les niveaux inférieurs à 30% [Wolkoff, Kjærgaard, 2007].

4-2. Effet sur les consommations énergétiques

Bien qu'avec les matériaux hygroscopiques qui interagissent dynamiquement avec l'air intérieur où ils sont exposés [Padfield, 1998], l'humidité peut être employée positivement pour améliorer les conditions intérieures et en conséquence réduire la consommation d'énergie. Les résultats des dernières études ont prouvé que ces matériaux peuvent réduire l'amplitude de l'humidité jusqu'à 40% [Zhang et al, 2012], [Li et al, 2012] et améliorer ainsi le confort thermique et la qualité de l'air perçue dans les bâtiments tout en induisant une consommation réduite de l'énergie [Simonson et al, 2002], [Hameury, 2005]. Dans les musées, l'inertie hydrique de l'enveloppe est utilisée comme traitement passif pour limiter les fluctuations d'humidité [Janssen, Christensen, 2013]. Les matériaux hygroscopiques (comme le bois massif dans la construction des murs et des planchers) se sont avérés capables d'amortir l'humidité et la température intérieure [Hameury, Lundstrom, 2004]. Cet effet régulateur ou ce « tampon » hydrique des matériaux hygroscopiques a fait l'objet de nombreuses études, surtout sur les matériaux bois ou à base de bois [Kunzel et al, 2004], [Woloszyn et al, 2009], [James et al, 2010], [Rafidiarison, 2012]. Mlakar et Strancar (2013) précisent, que pour des maisons passives, l'utilisation de pare vapeur au lieu de frein vapeur et le manque de matériaux tampon hydrique mènent à de fortes oscillations d'humidité intérieure. Ceci induisait de plus grandes charges d'humidité qui pourraient avoir un impact sur la durabilité du bâtiment et également sur sa performance énergétique.

Osanyintola et Simonson, (2006) ont constaté qu'il est même possible de réduire le chauffage et la climatisation de 5% à 30%, respectivement, en utilisant les matériaux hygroscopiques avec les systèmes HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) bien contrôlés. Les économies d'énergie les plus prometteuses sont pour des bâtiments avec climatisation sous climats chauds et humides (Figure I-8). Il y a cependant, un gain potentiel sous tous les climats si le système HVAC est employé en régulation de l'ambiance, du confort et de la qualité de l'air intérieur.

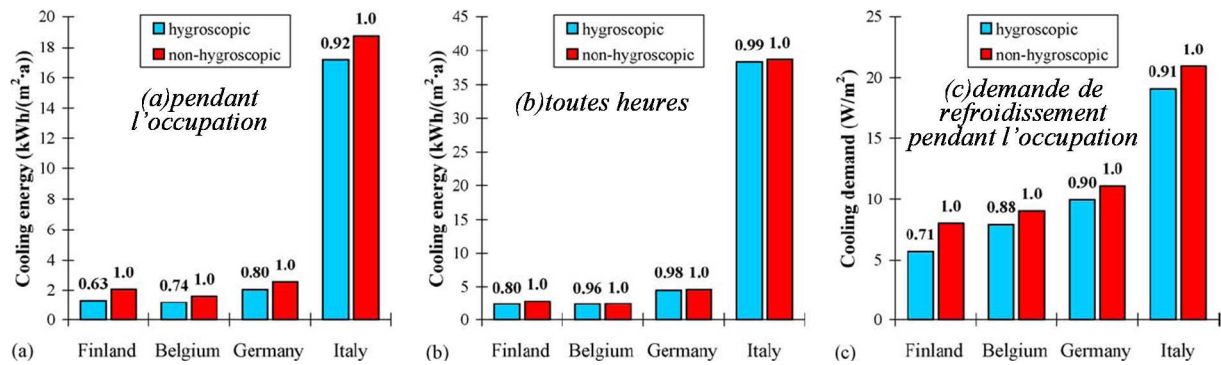


Figure I-8 : Énergie et puissance maximale de refroidissement requise pour climatiser une chambre à coucher (24 °C et 50% d'HR) (Source: Osanyintola, Simonson, 2006)

L'étude de Woloszyn et al, (2009) a ajouté que l'utilisation des matériaux de tampon hydrique et la ventilation hygroréglable (Relative-Humidity-Sensitive ventilation RHS) sont de bonnes solutions pour réduire la demande énergétique des logements et pour améliorer la qualité de l'air intérieur en réduisant l'amplitude des variations quotidiennes d'humidité. Dans les cas étudiés, l'utilisation du système hygroréglable a pu réduire le taux de ventilation moyen de 30 à 40% en période froide et générer de 12 à 17% d'économie d'énergie.

Selon Liu et al, (2013) la durée de la climatisation peut être réduite en tenant compte du transfert d'humidité dans le calcul de la température surfacique interne du mur. Celle-ci peut exercer un effet de rafraîchissement sur l'air intérieur et être bénéfique pour améliorer le confort thermique pendant les heures de travail en été. La consommation d'énergie en climatisation peut être réduite jusqu'à 40% pour le cas d'une maison en panneau de bois de pin.

4-3. Conclusion sur le rôle de l'enveloppe hygroscopique

L'enveloppe du bâtiment doit donc posséder des qualités **thermiques et hydriques** qui lui feront réagir de façon satisfaisante aux différentes sollicitations. Ces forces varient constamment en intensité et en durée. Elles entraînent des **échanges de chaleur et de masse** entre l'extérieur et l'intérieur.

L'enveloppe **hygroscopique** fonctionne grâce à un différentiel de pression partielle intérieur/extérieur qui permet de faire migrer **la vapeur d'eau** dans les murs, de l'ambiance présentant la pression la plus élevée à l'ambiance dont la pression est la moins élevée avec lesquels elle échange peu à peu sa **chaleur**.

Les matériaux naturels comme la pierre, la terre, le bois, le plâtre, ont des propriétés hygroscopiques désormais bien reconnues, qui leurs permettent d'absorber sans dommage les surplus ponctuels de **vapeur d'eau** et de les restituer quand les conditions le permettent tout en limitant le flux de chaleur vers l'extérieur (Figure I- 9). L'enjeu pour le concepteur est de disposer d'outils scientifiques pour évaluer et prédire ces phénomènes.



Figure I-9 : Transfert de chaleur et de masse à travers la paroi hygroscopique

5. Physique des transferts hygrothermiques dans les matériaux hygroscopiques

Une synthèse des mécanismes de stockage et de migration de la chaleur et de l'humidité dans les matériaux hygroscopiques, ainsi que les lois physiques et équations de conservation régissant ces phénomènes sont présentés dans ce qui suit.

5-1. Comportement hygroscopique

Les matériaux du bâtiment sont pour la plupart, des matériaux poreux. On peut discerner deux types de matériaux poreux : les matériaux hygroscopiques, comme le bois par exemple, et les matériaux non-hygroscopiques, comme le polystyrène.

5-1-1. Isothermes de sorption

Les matériaux hygroscopiques sont capables de fixer l'humidité contenue dans l'air ambiant. Cela peut être mis en évidence en mettant un matériau relativement sec dans une enceinte dont l'air est à une température T et une humidité relative Hr données. Par pesées régulières, il est constaté que la masse de l'échantillon augmente, jusqu'à se stabiliser à une valeur d'équilibre. Ainsi, le matériau fixe des molécules d'eau provenant de la vapeur d'eau présente dans l'air humide. C'est le phénomène **d'adsorption physique** de la vapeur d'eau, Figure I-10.

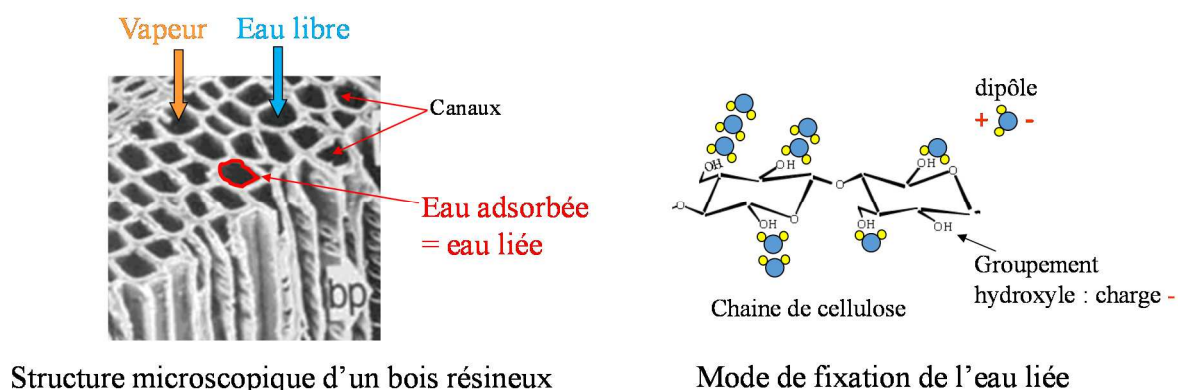


Figure I-10 : Modes de transfert d'humidité et sites de sorption dans le bois

La teneur en eau pondérale moyenne \bar{w} est définie comme le rapport de la masse d'eau M_w contenue dans un échantillon humide de masse M_h , à la masse sèche M_s de ce même échantillon.

$$\bar{w} = \frac{M_w}{M_s} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{I.1})$$

On traduit ce phénomène par des courbes reliant l'évolution de la teneur en eau d'équilibre à l'humidité relative de l'air, ceci à une température donnée. Ces courbes s'appellent **isothermes de sorption**, qui pour la plupart des matériaux du bâtiment, ont la forme montrée en Figure I-11.

Si nous suivons le chemin inverse de la sorption, en imposant à l'échantillon une série d'équilibres thermodynamiques décroissants en humidité relative, on remarque que le matériau s'équilibre à des teneurs en eau plus importantes qu'en adsorption, à humidité relative égale. C'est le phénomène d'**hystérésis**. Autrement expliqué, sur tout le domaine d'humidité relative, une hystérésis entre adsorption et désorption sera présente, traduisant le fait qu'il est plus facile de fixer des molécules d'eau dans le réseau poreux plutôt que de les arracher, et ce, du fait des forces capillaires.

Du fait que l'isotherme de sorption caractérise la capacité du matériau à stocker de l'eau sous l'effet d'une variation d'humidité relative, on définit la capacité hydrique ξ comme la pente de la courbe isotherme de sorption :

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial Hr} \quad (\text{I.2})$$

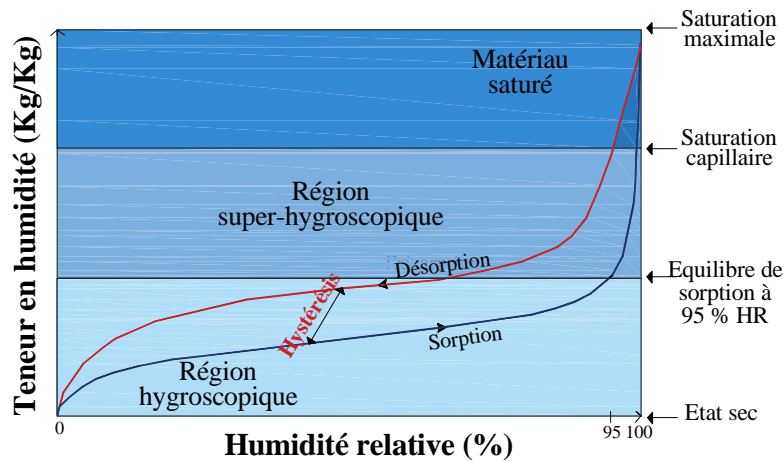


Figure I-11 : Allure générale d'une isotherme de sorption/désorption

5-1-2. Modèles d'isothermes

Plusieurs modèles empiriques ont été développés dans le passé pour décrire ces isothermes de sorption. On cite en exemple les modèles de Guggenheim – Anderson - Boer (GAB.), de Langmuir, 1918 ; de Brunauer-Emmet-Teller (BET), 1938 ; de Smith, de Henderson, 1952 ; d'Oswin, et de Chung. Merakeb (2006) a développé un modèle analytique basé sur la thermodynamique de l'équilibre de phase de l'eau liée avec sa pression de vapeur saturante. La relation entre la teneur en eau et l'humidité relative est donnée par l'expression suivante :

$$w = w_s \exp(\phi \cdot \ln(Hr) \cdot \exp(a \cdot Hr)) \quad (I.3)$$

ϕ désigne un paramètre thermodynamique corrélé à la chaleur de sorption. w_s représente l'humidité d'équilibre atteinte dans une ambiance saturée (100 %HR). Enfin, le coefficient a est un paramètre de calage permettant, entre autre, d'affiner la courbure de l'isotherme. Pour tenir compte de l'effet d'hystérésis, les paramètres d'adsorption et de désorption peuvent être différenciés.

5-1-3. Hystérésis et isothermes partielles

Les courbes isothermes présentées plus haut correspondent à des équilibres obtenus pour des variations monotones de Hr sur l'intervalle [0%, 100%]. On parle alors de courbes enveloppes. Dans la réalité d'un bâtiment, les variations de Hr ne sont pas aussi extrêmes et couvrent plutôt une plage de 40 à 80%. Les modèles de Merakeb (2006) et de Pedersen (1990) proposent des lois d'interpolation pour définir des isothermes partielles, comprises à l'intérieur des courbes enveloppes. Celles-ci permettent de prédire le tracé d'évolutions à partir d'un point quelconque à l'intérieur du cycle, introduisant ainsi la notion d'histoire hydrique du matériau.

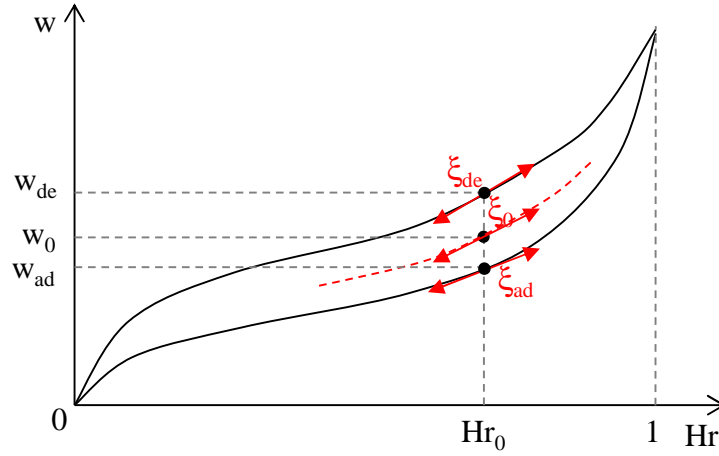


Figure I-12 : Construction d'une courbe isotherme partielle

Ainsi, Pedersen définit, pour un point (Hr_0, w_0) intérieur au cycle, un coefficient directeur local ξ_0 de l'isotherme partielle au moyen d'une interpolation entre les capacités hydriques des courbes isothermes enveloppe d'adsorption et de désorption (respectivement ξ_{ad} et ξ_{de}) à la même abscisse Hr_0 . Il est donc possible de construire l'isotherme partielle par la mise bout à bout de segments infinitésimaux de pente variable ξ_0 . L'expression de la capacité hydrique dépend du sens d'évolution de l'humidité relative : ξ_{0de} pour la désorption et ξ_{0ad} pour l'adsorption.

$$\xi_{0de} = \frac{(w_0 - w_{ad})^A \xi_{de} + B_{de} (w_{de} - w_0)^A \xi_{ad}}{(w_{de} - w_{ad})^A} \quad (I.4)$$

$$\xi_{0ad} = \frac{B_{ad} (w_0 - w_{ad})^A \xi_{de} + (w_{de} - w_0)^A \xi_{ad}}{(w_{de} - w_{ad})^A} \quad (I.5)$$

Pedersen adopte les valeurs $A = 2$ et $B_{ad} = B_{de} = 0.1$, alors que Kwiatkowski, (2009) généralise à des valeurs décimales de A . En définitive, ces paramètres sont à identifier à partir de données expérimentales sur des cycles partiels, ces dernières étant malheureusement assez peu répandues en bibliographie.

5-2. Mécanismes de transfert d'humidité

Selon la force motrice qui gouverne le mode de transfert dans un matériau poreux, l'humidité peut transiter sous différentes formes et de diverses façons. Le Tableau I-1 ci-dessous donne les mécanismes distincts du transfert d'humidité (vapeur et liquide) pourront-être engendrés

dans les composants du bâtiment [Künzel, 1995]. La part de chacun de ces mécanismes, sur la quantité d'eau fixée, dépend particulièrement des propriétés du matériau (porosité, morphologies des pores, état de surface des pores, nature chimique des composés,..), des conditions climatiques dans lequel il est placé (pression et température) et enfin de la nature de la phase aqueuse (liquide ou vapeur).

Tableau I-1 : Les différents mécanismes de transport d'humidité dans les composants du bâtiment

| Mécanismes de transport d'humidité | | Forces motrices |
|------------------------------------|---|--|
| Transport de vapeur | Diffusion de vapeur Transport moléculaire Advection | Pression de vapeur Pression de vapeur Pression totale |
| Transport de liquide | Migration capillaire Migration d'eau liée Flux gravitationnel Flux hydraulique Électrokinésie Osmose | Succion capillaire Teneur en eau Gravité Différence de pression totale Champs électriques Concentration ionique |

Source: (Künzel, 1995)

5-3. Changement d'état de l'eau

Quand le changement de phase se produit au sein du matériau hygroscopique, il y a alors une absorption ou libération d'énergie H_s dans le matériau. La quantité de chaleur libérée lorsqu'un kilogramme d'eau passe de l'état vapeur à l'état liquide correspond à la chaleur latente de vaporisation, qui sera en première approximation : $H_L = 2500 \text{ J/kg}$. En réalité, l'eau adsorbée dans un milieu poreux a un niveau énergétique inférieur à celui de l'eau liquide ordinaire. L'écart correspond à la chaleur différentielle de sorption notée ΔH_s . Cela signifie qu'il faudra plus d'énergie à une molécule d'eau adsorbée pour s'échapper et s'évaporer, qu'à une molécule d'eau liquide.

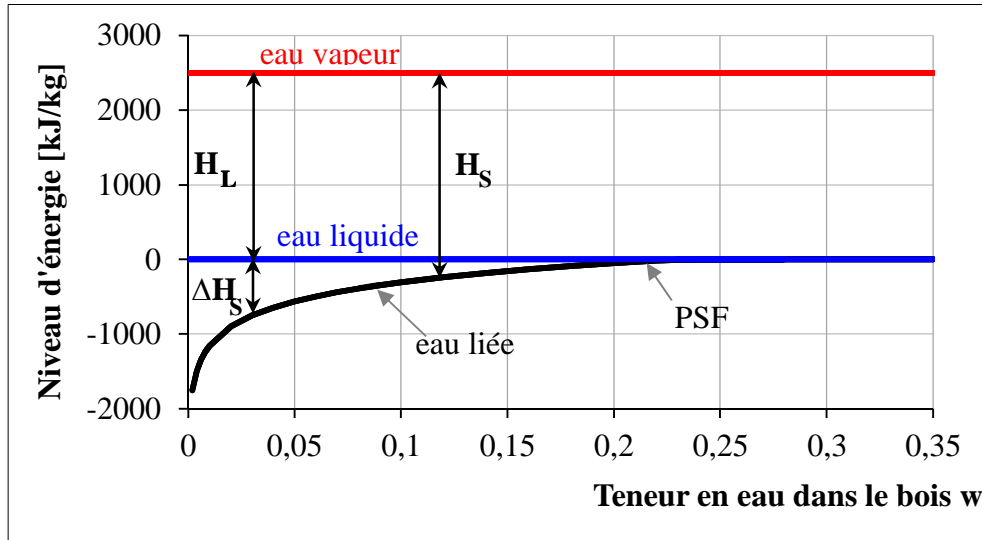


Figure I-13 : Niveau d'énergie de l'eau dans le bois par rapport à l'eau libre

Perré et al (2007) ont employé un modèle logarithmique pour la chaleur différentielle de sorption, qui s'annule au point de saturation des fibres (PSF). Lorsque $w \leq w_s$:

$$\Delta H_s = A_s \cdot \ln\left(\frac{w}{w_s}\right) \quad (I.6)$$

Où w_s est la teneur en eau de saturation des fibres ($w_s = 0.23$ pour le bois), et A_s un coefficient de calage afin d'avoir un modèle qui se rapproche des essais expérimentaux.

5-4. Lois de transferts thermique et hydrique

Les lois phénoménologiques classiques qui régissent le transfert par diffusion (Fourier pour la chaleur, ou Fick et Darcy pour la masse) traduisent le fait que le flux est proportionnel au gradient d'un potentiel moteur, qui peut être choisi parmi différentes grandeurs physiques en fonction du modèle adopté. Le choix des potentiels est une décision importante, qui peut conditionner la plus ou moins bonne adéquation du modèle à une classe de problèmes à étudier. Ainsi, parmi les modèles de transferts couplés en milieu poreux les plus utilisés et les plus admis, les modèles macroscopiques de Luikov et de Phillip et de Vries considèrent la température T et la teneur en humidité pondérale w en tant que potentiels de diffusion, ce qui conduit aux équations de transferts couplés suivantes (en 1D) :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial x} + D_{Tw} \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (I.7)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D_w \frac{\partial w}{\partial x} + D_{wT} \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (I.8)$$

Cette approche, initialement utilisée par le GEMH [Merakeb, 2006], peut présenter plusieurs difficultés dans le cadre de la présente étude. Tout d'abord, le profil de teneur en humidité est discontinu à l'interface entre deux milieux poreux en raison de leurs comportements hygroscopiques différents, ce qui crée des difficultés pour l'écriture des équations de continuité via les isothermes de sorption. D'autre part, dans le modèle classique de Luikov, parmi les quatre coefficients de diffusion D_T , D_w , D_{Tw} , D_{wT} , seul le coefficient de conductivité thermique $D_T = \lambda$ est couramment disponible en bibliographie et bien connu des concepteurs. Cette approche entraîne aussi des difficultés d'exploitation des résultats expérimentaux lorsque l'humidité relative Hr est mesurée dans une cavité. Enfin, l'impossibilité d'effectuer le découplage entre diffusion phase liquide et diffusion phase vapeur constitue un blocage pour les développements futurs.

Le modèle qui a retenu notre attention se rapproche de celui utilisé dans WUFI [Künzel, 1995]. Les équations couplées utilisées ont comme potentiels de diffusion :

- thermique : la **température** T [K]
- hydrique : la pression de vapeur, par le biais de l'**humidité relative** H_r [$0 \leq H_r \leq 1$]

Une hypothèse forte consiste à supposer qu'en tout point du matériau, l'équilibre hygroscopique est atteint, c'est-à-dire que la teneur en eau du matériau correspond à l'humidité relative de l'air humide dans le réseau des vides, conformément aux courbes isothermes de sorption. Il est probable que cette hypothèse ne sera plus valide dans des matériaux à forte porosité ouverte, pour lesquels la vapeur peut migrer rapidement dans les canaux ou macropores, donnant lieu à des variations rapides d'humidité relative, sans que l'équilibre hygroscopique n'ait pu être atteint localement.

Le tableau VI-2 donne les différentes équations de diffusion, en thermique pure en en hydrique. Pour des raisons de simplicité, elles ne sont présentées ici qu'en mode unidimensionnel. On remarque l'analogie formelle entre les équations thermiques et hydriques, et le bas du tableau montre les correspondances entre grandeurs et coefficients analogues.

Tableau I-2 : Equations de diffusion thermique et hydrique

| | <i>Diffusion thermique</i> | <i>Diffusion hydrique</i> |
|----------------------------|---|---|
| Equations | Densité surfacique de flux (Fourier) : $\varphi_t = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \quad (I.9)$ | Densité surfacique de flux (Fick) : En phase liquide : $\varphi_{wl} = -\rho_s D_w \frac{\partial w}{\partial x} = -\rho_s D_w \frac{\partial w}{\partial Hr} \frac{\partial Hr}{\partial x} \quad (I.10)$ En phase vapeur : $\varphi_{wv} = -\delta \frac{\partial p_v}{\partial x} = -\delta \frac{\partial (Hr p_{vs})}{\partial x} \quad (I.11)$ Au total (liquide + vapeur) : $\varphi_w = -\rho_s D_w \left(\frac{\partial w}{\partial Hr} \right) \frac{\partial Hr}{\partial x} - \delta \frac{\partial (Hr p_{vs})}{\partial x} \quad (I.12)$ |
| | Echange superficiel : $\lambda \frac{\partial T}{\partial x} = h_t (T_a - T_{surf}) \quad (I.13)$ T_a : température ambiante | Echange superficiel : $\delta \frac{\partial p_v}{\partial x} = h_v (p_{va} - p_{vsurf}) \quad (I.14)$ p_{va} : pression de vapeur dans l'air ambiant |
| Grandeurs physiques | φ_t [W.m ⁻²] : densité de flux thermique | φ_w [kg.m ⁻² .s ⁻¹] : densité de flux hydrique |
| | $(\rho C) *$ [J.m ⁻³ .K ⁻¹] : chaleur volumique du matériau humide | $\frac{\partial w}{\partial Hr} = \xi$: capacité hydrique (pente de l'isotherme de sorption) |
| | λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹] : conductivité thermique | D_w [m ² .s ⁻¹] : coefficient de diffusion en phase liquide δ [kg.s ⁻¹ .m ⁻¹ .Pa ⁻¹] : perméabilité à la vapeur |
| | T [K] : température | p_v [Pa] : pression de vapeur p_{vs} [Pa] : pression de vapeur saturante |
| | h_t [W.m ⁻² .K ⁻¹] : coefficient d'échange thermique superficiel | h_v [s.m ⁻¹] : coefficient d'échange hydrique superficiel |

En restant dans le cadre unidimensionnel, les équations de conservation appliquées à une tranche de matériau d'épaisseur infinitésimale dx et à un intervalle de temps infinitésimal dt sont établies comme suit :

- Conservation de l'énergie :

$$dx(\rho C) * (T(t+dt) - T(t)) = (\varphi_t(x) - \varphi_t(x+dx))dt + H_s(\varphi_{wv}(x) - \varphi_{wv}(x+dx))dt \quad (I.15)$$

d'où :

$$(\rho C) * \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + H_s \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial (Hr p_{vs})}{\partial x} \right) \quad (I.16)$$

- Conservation de la masse :

$$dx \rho_s (w(t+dt) - w(t)) = (\varphi_{wl}(x) - \varphi_{wl}(x+dx))dt + (\varphi_{wv}(x) - \varphi_{wv}(x+dx))dt \quad (I.17)$$

d'où :

$$\rho_s \frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho_s D_w \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial p_v}{\partial x} \right) \quad (I.18)$$

soit, en faisant apparaître l'humidité relative en tant que potentiel de diffusion :

$$\rho_s \left(\frac{\partial w}{\partial Hr} \right) \frac{\partial Hr}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho_s D_w \left(\frac{\partial w}{\partial Hr} \right) \frac{\partial Hr}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial (Hr p_{vs})}{\partial x} \right) \quad (I.19)$$

L'effet de couplage thermo-hydrique apparaît, d'une part dans l'équation (I.16) dans le terme

$H_s \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial (Hr p_{vs})}{\partial x} \right)$ qui traduit l'échange de chaleur mis en jeu lors de l'échange d'eau par

adsorption ou désorption avec la phase vapeur, et d'autre part dans l'équation (I.19) par le biais de la pression de vapeur saturante p_{vs} , qui est fortement dépendante de la température. Le schéma ci-dessous (Figure I-14) synthétise les différentes formes de transferts et de stockage : thermique et massique sous forme liquide et vapeur, ainsi que les interactions entre elles.

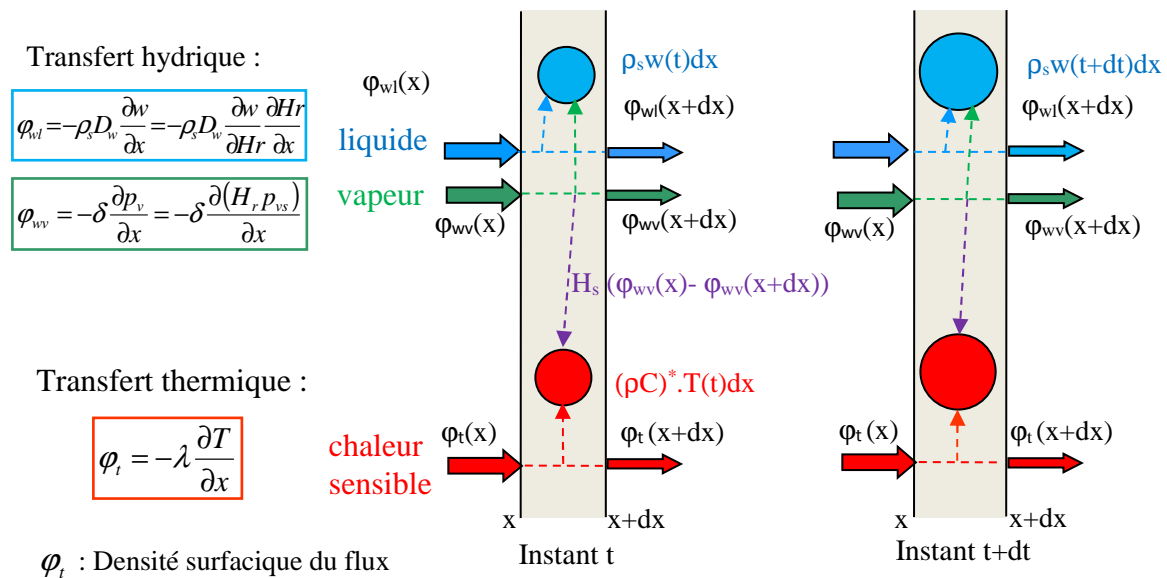


Figure I-14 : Représentation schématique des bilans thermiques et hydriques sur une tranche infinitésimale de matériau

Selon cette approche, les mécanismes d'échange hydrique dans un matériau en conditions isothermes dépendent donc de l'influence conjointe de diverses propriétés telles que le coefficient de diffusion liquide, la perméabilité à la vapeur, la capacité hydrique et le coefficient d'échange hydrique superficiel. La recherche d'une grandeur unique peut s'avérer nécessaire pour quantifier les propriétés de tampon hydrique d'un matériau.

5-5. Valeur du tampon hydrique (MBV)

La valeur de la capacité tampon hydrique (VCTH) ou « Moisture buffer value-MBV », indique la quantité d'eau adsorbée ou désorbée lorsque le matériau est soumis à des variations répétées de l'humidité relative ambiante pour une amplitude et une période données. Elle est utilisée pour décrire l'adsorption dynamique de l'humidité. Sa valeur est exprimée en $g.m^{-2}.\%HR^{-1}$. Lorsque l'épaisseur du matériau est supérieure à la profondeur de pénétration hydrique pour une fréquence de variation de Hr donnée, la MBV est indépendante de l'épaisseur du matériau et de l'amplitude de variation de l'humidité relative. La capacité tampon hydrique caractérise donc la capacité d'un matériau à modérer les variations d'humidité relative de l'air avoisinant.

Son test utilise la méthode étape-réponse. On enregistre la variation de masse pendant les cycles reproductifs Hr d'un échantillon avec une surface exposée connue. Les différents protocoles tests existants [JSA, 2002], [Rode, 2005] utilisent le même principe d'exposition des échantillons aux variations dans les cycles quotidiens d'humidité relative et l'enregistrement du changement de masse au sein de l'échantillon. Les variables considérées par les protocoles sont les pas de temps, les niveaux d'humidité relative, les dimensions des échantillons et la résistance de surface (associés à la vitesse de l'air).

Osanyintola et al, (2006) ont montré que la capacité tampon hydrique dépend des conditions initiales et de l'épaisseur du matériau (le contre-plaqué dans leur cas) aussi bien que le coefficient du film extérieur et le cycle d'humidité. La capacité tampon hydrique du contre-plaqué de sapin dépend aussi des coefficients de transfert convectif, elle augmente à mesure que les coefficients de convection et l'épaisseur augmentent.

Meissner et al, (2010) ont présenté dans leur travail un appareil expérimental de grandeur nature pour évaluer l'inertie hygroscopique des matériaux de construction poreux, dont le principe est basé sur des mesures de variations de masse d'un matériau poreux quand son environnement voisin est soumis à une variation cyclique quotidienne de l'humidité relative.

6. Outils de modélisation

6-1. L'humidité et les codes de simulation énergétiques

La majorité des codes de simulation énergétique du bâtiment néglige l'humidité de l'air, ou bien la représente de manière très simplifiée. Souvent l'humidité est transportée par l'air, alors que dans la majorité des cas réels ses interactions avec les matériaux hygroscopiques ne peuvent être négligées [Woloszyn, 1999]. En réalité, le calcul de la conduction de chaleur par les murs omet dans la plupart des cas, le stockage et le transport de l'humidité dans la structure poreuse des murs. Ces derniers sont normalement soumis aux gradients de flux de chaleur et d'humidité de sorte qu'une détermination précise de transfert thermique exige un calcul simultané des effets sensibles et latents. Selon Mendes et al (2003), les modèles qui ignorent l'humidité peuvent surestimer les charges maximales de conduction jusqu'à 210% et sous-estiment le flux de chaleur annuel intégré jusqu'à 59%.

La plupart des modèles élaborés ont presque la même origine : le modèle de Philip et De Vries [Philip, De Vries, 1957] et les lois de Fourier, de Fick et de Darcy. La différence principale parmi eux est liée aux prétentions particulières utilisées. Dans le modèle MOIST, proposé et validé par Zarr et al (1995), les transferts thermo hydriques ont été décrits dans un mur en bois. Künzle et al, (2005) ont validé un modèle thermo hydrique (WUFI+) en utilisant des mesures effectuées sur un bâtiment test. Ils ont utilisé la pression capillaire et l'humidité relative comme potentiels de migration d'humidité, respectivement en phase liquide et gazeuse. Toutefois deux modèles simplifiés sont généralement utilisés dans la simulation numérique. Le premier est celui de « la profondeur effective de la pénétration d'humidité » (EMPD) [Kerestecioglu, Gu, 1989], qui suppose que seule une couche extérieure mince du matériau intérieur contribue au processus d'amortissement d'humidité. Le second, appelé le modèle de « capacitance effective » (EC), estime que la vapeur d'eau dans la partie active de l'enveloppe du bâtiment est en équilibre avec l'humidité d'air de la pièce à tout moment. Ce dernier modèle de tampon hydrique est implémenté dans des codes de simulation comme TRNSYS ou EnergyPlus.

Tous les outils proposés nécessitent, comme données d'entrée, les propriétés thermo-physiques des parois (matériaux, épaisseurs, etc.). Avec une difficulté, les propriétés des matériaux hygroscopiques ne sont pas constantes et varient considérablement avec les paramètres environnementaux. Ainsi les équations couplées sont fortement non linéaires et peuvent seulement être résolues numériquement. Ces méthodes numériques incluent

généralement l'une des techniques suivantes : différences finies, éléments finis, fonction de transfert, volumes finis, éléments de limites, méthode effective de coefficient de conduction de chaleur, etc. L'applicabilité des solutions numériques est puissante, particulièrement pour les problèmes difficiles à être résolus par les méthodes analytiques. Tant que l'analyse discrète et la méthode de résolution sont appropriées, les solutions numériques sont précises.

Les recherches sur ces méthodes ont vu leur nombre augmenter surtout au cours des deux dernières décennies. Dans le travail de l'annexe 24 [IEA, 1996], cinq programmes de base physique semblable ont été présentés en détail : 1D-HAM, WUFIZ, MATCH, HYGRAN24 et LATENITE. Ces modèles, comme celui utilisé dans MOIST, ont été jugés généralement fiables, particulièrement pour les conditions météorologiques qui ne sont pas trop humides.

Pourtant, la reproduction correcte et parfaite du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques par les modèles numériques n'est pas encore à l'ordre du jour. Plus récemment, des écarts entre mesures et simulations numériques en régime transitoires des matériaux hygroscopiques ont été constatés dans différents projets de recherche (Annexes 24 et 41 de l'Agence Internationale de l'Energie, ANR PREBAT OPTI-MOB, HYGRO-BAT [Woloszyn et al, 2014]). Ces écarts ont été attribués à la complexité de la problématique. Par contre on n'a pas identifié l'origine réelle de ces écarts, ni mis en place des outils plus adaptés.

Dans le cadre de l'Annexe 41 de l'AIE (programme ESBCS) [Woloszyn et al, 2008], 17 outils de simulation du comportement thermique et/ou aéraulique, intégrant un bilan hydrique complet, ont été utilisés dans six exercices de comparaison (parmi eux TRNSYS et Wufi). Ces derniers ont été conduits avec différents benchmarks (dont deux basés sur des résultats expérimentaux) servant à tester les capacités des outils de simulation à donner des éléments de validation des codes de calcul. Aussi, des travaux de modélisation ont été développés à plusieurs échelles : des modèles globaux simplifiés, à travers des modèles multi-zones, jusqu'à une approche CFD (Computational Fluid Dynamics) intégrée avec des codes de transferts couplés à travers les parois. Une bonne performance de l'ensemble des outils de simulation a été constatée. Les écarts les plus importants étaient en cas de présence de matériaux hygroscopiques. Ceci a été justifié par l'utilisation des modèles simplifiés de tampon hygroscopique sans procéder à un ajustement de paramètres [Woloszyn et al, 2008]. Pour cela, il s'est conclu dans le Groupe d'Analyse Prospective Thématique (GAT) Bâtiment que les expérimentations permettant l'analyse fine des transferts couplés doivent être développées pour la mise en œuvre des modèles de simulation les plus adaptés [Woloszyn, 2013].

6-2. Modèles d'humidité de TRNSYS : Stockage de surface et profondeur

Comme cela a été déjà évoqué précédemment, deux modèles simplifiés sont implémentés dans TRNSYS. Le premier, à un seul paramètre, simule le comportement d'un volume complémentaire fictif représentant les matériaux de la pièce (zone) réagissant avec l'humidité de l'air. Dans le deuxième modèle, le comportement des parois est représenté en deux couches ; une couche superficielle réagissant avec l'humidité de la zone et une couche de stockage profond échangeant l'humidité avec la couche superficielle. Ce système amortisseur est caractérisé par un nombre réduit de coefficients. Ils sont évalués avec plus au moins de précision, en donnant une description des matériaux de la pièce et de leurs propriétés [TRNSYS, 2009]. Le TYPE 56 multizone de TRNSYS inclut cet amortisseur hygroscopique.

Récemment, le développement d'un modèle (appelé Humi-mur) implémenté dans TRNSYS, tenant compte de l'effet d'hystérésis sur la sorption d'humidité ainsi que sa validation et des études de sensibilité au niveau du matériau ont été présentées. La praticabilité de l'intégration de ce modèle au niveau du bâtiment a été montrée. Les résultats préliminaires ont prouvé qu'au niveau de la pièce, le phénomène d'hystérésis influence le climat intérieur en termes d'humidité relative [Kwiatkowski, 2009]. Le modèle a été aussi utilisé pour prévoir l'humidité relative intérieure et comparé à un benchmark expérimental. Le dispositif original du modèle est qu'il représente le phénomène d'hystérésis entre l'adsorption et la désorption [Kwiatkowski, 2011].

6-3. Modèle couplé de Wufi

Le logiciel Wufi, (2015) développé dans le cadre de la thèse de Kunzel, 1995, et validé par le Fraunhofer Institut Bauphysik de Holzkirchen en Allemagne permet d'évaluer le comportement des parois multicouches soumises à un régime climatique dynamique. Il considère non seulement la dynamique des flux de chaleur (transfert et stockage), mais aussi celle des flux d'humidité. Les comportements hydriques et thermiques d'un composant étant fortement liés, cela permet de prendre en compte leurs interactions et l'effet de celles-ci sur les performances d'ensemble des parois. L'outil exige les propriétés standards du matériau et le stockage d'humidité et les fonctions du transport du liquide. Il peut utiliser les données météorologiques mesurées (y compris la pluie battante et la radiation solaire) afin de simuler le comportement du composant dans des conditions atmosphériques réelles. Dans WUFI Pro on étudie les parois en une dimension ; dans WUFI 2D on modélise les nœuds constructifs en deux dimensions ; dans WUFI Bio, couplé à l'un ou l'autre des logiciels précédents, on détaille le développement des moisissures selon leur type ; enfin dans WUFI Plus on étudie l'évolution

des conditions climatiques intérieures d'un bâtiment selon le climat extérieur et le type d'enveloppe.

Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet d'une vision générale des travaux de recherche menés sur le comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques. La physique des transferts de vapeur d'eau et d'eau liquide au sein d'un matériau est complexe, d'où la difficulté du sujet. D'après ces recherches, la caractérisation du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques est réalisée suivant trois échelles : Matériau, Système ou Composant, Bâtiment. Néanmoins très peu de recherches ont abordé les trois échelles de caractérisation dans une même étude. Si celle du matériau et celle du système sont évoquées, celle du bâtiment est négligée ou présentée d'une manière très sommaire. La relation de l'enveloppe avec le climat extérieur et le comportement des occupants sont souvent oubliés. Le matériau ou la paroi sont surtout examinés dans des enceintes climatiques, et non comme partie intégrante de l'enveloppe hygroscopique habitée.

Les enveloppes bois et à base de bois ont été les plus largement étudiées. Celles en béton de chanvre ont été les plus documentées au niveau des bétons végétaux. Toutefois, les caractérisations thermo hydriques des enveloppes en béton de bois, en pierre n'ont quasiment pas été entamées.

Ce chapitre a été aussi sujet de l'humidité et de ses effets négatifs sur le confort thermique et la santé des usagers, sur la consommation énergétique et sur la durabilité du bâtiment. En réponse, les matériaux hygroscopiques (bois, terre, paille, béton végétaux) sont apparus comme des modérateurs des niveaux élevés d'humidité relative, avec des effets bénéfiques sur le confort hygrothermique, la consommation de l'énergie et la qualité de l'air intérieur.

D'autre part, il a été noté que les modèles numériques établis manquent parfois de précision, et jusque-là aucun modèle n'a pu reproduire le comportement exact de l'enveloppe hygroscopique. On a souligné que la prise en compte de l'hystérésis dans les modèles donne des résultats proches des données mesurées et expérimentales.

Chapitre II

Monitoring des maisons habitées : Point de vue architectural et bioclimatique

« On fait la science avec des faits, comme on fait une maison avec des pierres : mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison. »

Henri Poincaré

Introduction

Le premier travail de caractérisation thermo hydrique de l'enveloppe hygroscopique a concerné le monitoring de maisons habitées. Dans le but de donner plus de signification aux cas d'étude choisis, les données de chacun ont été scrutées selon quatre angles d'analyse, à savoir, descriptive, explicative, compréhensive et classificatrice. Trois études climatique, bioclimatique et microclimatique ont été établies en premier lieu pour caractériser le climat de l'environnement d'étude, et pour dévisager les principaux paramètres extérieurs qui interagissent sur la réponse de l'enveloppe hygroscopique. Ensuite, le niveau du confort hygrothermique dans chaque maison a été discuté, en prenant en compte l'évolution des températures et hygrométrie de l'air intérieur et extérieur en période hiver, été et mi-saison. La consommation énergétique (chauffage) a également été étudiée. Enfin, une simulation numérique du comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques, via le logiciel TRNSYS, a été menée pour vérifier si y a nécessité ou non d'un couplage thermo hydrique dans les transferts de chaleur et de masse à l'échelle de la maison habitée.

1. Choix des maisons (en Algérie, en France)

Quatre maisons, situées sous divers climats et construites avec différents matériaux hygroscopiques, ont été choisies en monitoring : trois en Algérie et une en France, Figure II-1.

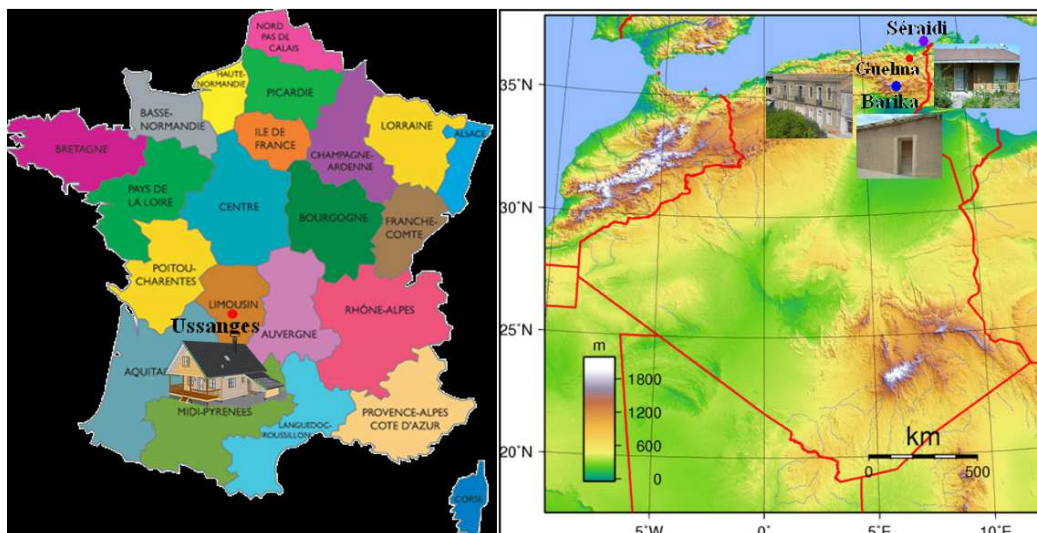


Figure II-1 : Situation géographique des maisons choisies pour le monitoring

Le choix des maisons porte surtout sur le système constructif différent des enveloppes hygroscopiques et sur la diversité climatique de leur situation. Les enveloppes choisies en

terre/paille, pierre, plaque de plâtre, ossature bois couvrent presque la totalité des climats locaux algériens (du chaud sec au froid pluvieux de montagne) avec un type représentatif du climat français (à tendance océanique). Le tableau II-1 récapitule les spécificités des maisons.

Tableau II-1 : Récapitulatif des caractéristiques des maisons choisies pour le monitoring

| N° | Constructeur | Région/ département | Altitude (m) | Surf. habitable (m ²) | Profil paroi | Épais. paroi (cm) | Type de chauffage/ECS |
|----|----------------------|----------------------------|-----------------|---|--|-------------------------|---------------------------------|
| M1 | Auto construction | O. Ammar Barika/ Alg | 451 | 174,55 | Terre-paille end. plâtre | 60 | À gaz butane (en bouteille) |
| M2 | Époque coloniale | Guelma/ Alg | 266 | 78,30 (R.D.C) | Pierre end. ciment end. plâtre | 56 | À gaz naturel (gaz de ville) |
| M1 | PROCEDER | Séraïdi/Alg | 846 | 88 | Placoplâtre + mousse polyuréthane end. ciment | 10 | À gaz naturel (gaz de ville) |
| M4 | AFC Bois | Ussanges (Treignac)/Fra | 557 | 105,6 (RDC+Étage) | Bois + laine minérale | 28,2 | Électrique+ à bois |

2. Instrumentations

Dix enregistreurs autonomes de température et d'humidité relative « LogTag » ont été utilisés pour le monitoring des trois maisons habitées en Algérie, Figure II-2. L'enregistreur « LogTag » a une capacité mémoire de 2 x 8000 points pour l'humidité et la température. Sa précision est de $\pm 3\%$ HR (25°C, 20%...80% HR) et de $\pm 1\text{K}$ (0°C...50°C). Sa plage de mesure est de 0 à 100% d'humidité relative et de -40 à +85°C de température avec un pas de prise pouvant aller de 30 secondes à plusieurs heures. Sa résolution est de 0,1% HR et 0,1°C.



Figure II-2 : Enregistreur de température et d'humidité relative « LogTag »

(Source : <http://logtagrecorders.com/>)

Pour la maison en pierre à Guelma, un thermocouple «EL-USB-TC-LCD» a été utilisé pour la mesure de la température de surface. L'enregistreur est autonome, stocke plus de 32.000 lectures de température. Sa plage de mesure est de -200 à +1300 °C, d'un éventail d'opération de température de -10 à +40 °C avec un taux d'enregistrement de chaque seconde jusqu'à chaque 12 h. D'une résolution (interne et affichée) de 0,5 °C. Sa précision de ± 1 °C, concerne seulement l'enregistreur de données et exclut la sonde de thermocouple. Ce dernier est attaché par l'intermédiaire de la douille à la base de l'unité, Figure II-3. Les données enregistrées peuvent facilement être établies et téléchargées par connexion au port USB d'un PC.



Figure II-3 : Enregistreur de température surfacique « EL-USB-TC-LCD »

(Source : <http://logtagrecorders.com/>)

Dans la maison à ossature bois de Treignac, plusieurs appareils de mesure ont été installés. Quatre capteurs capacitifs ont été utilisés pour les relevés de température et d'humidité relative « FHA646-E1 », Figure II-4. Un compteur « Delta-Dore TYWatt 40 » mesure la consommation d'énergie électrique dans la maison. Il délivre une impulsion électrique à chaque wattheure consommé, et ce, via un connecteur spécifique « Ahlborn, ZA9909AK2U », Figure II-5.



Figure II-4 : Capteur capacitif de température et d'humidité relative « FHA646-E1 »

(Source : www.wimesure.fr)



Figure II-5 : Compteur d'impulsion « Ahlborn ZA9909AK2U » (Source : www.wimesure.fr)

Les différents capteurs ont été raccordés à un module d'acquisition comportant 9 entrées « ALMEMO 8590-9 », Figure II-6, disposant d'une mémoire interne de 512 Ko permettant de stocker jusqu'à 1000.000 valeurs de mesures. Le tableau II-2 ci-dessous donne les caractéristiques des capteurs utilisés.

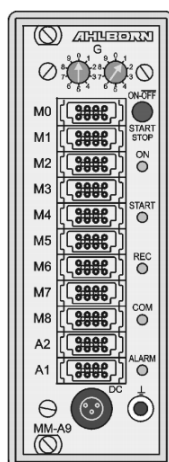


Figure II-6 : Module d'acquisition « ALMEMO 8590-9 » (Source : wimesure.fr)

Tableau II-2 : Caractéristiques des capteurs de mesure utilisés dans la maison à ossature bois

| Type | Référence | Marque | Plage | Précision |
|-------------------------|---------------------------|------------------------------|-------------------|--|
| Thermo - hygromètre | FHA646E1 | Wimesure (ex- Ahlborn) | 0 – 100% | ± 2% de HR dans la plage < 90% HR à T nominale |
| | | | -20 à + 80°C | -20 à 0°C : ±0.4 °C 0 à 70°C : ±0.1°C 70 à 80°C: ±0.6 °C |
| Compteur d'impulsion | TYWatt 40 + ZA9909AK2U | Delta-Dore + Wimesure | 0 à 65 000 imp | 1imp |
| Module d'acquisition | ALMEMO 8590-9 | Ahlborn | | |

3. Maison en terre et paille à Ouled Ammar (Barika en Algérie)

3-1. Caractérisation climatique de l'aire d'étude

La connaissance des variables climatiques et leurs différentes combinaisons, représente un principe essentiel dans la conception et le confort hygrothermique dans l'habitat. Le climat est le premier facteur agissant sur la réponse de l'enveloppe du bâtiment. Une étude climatique préliminaire peut contribuer à bien poser les problèmes de transfert de chaleur et de masse à travers l'enveloppe hygroscopique. Ces problèmes, exprimés par les bilans de transferts, nécessitent des conditions initiales et aux limites inspirées du contexte de l'aire d'étude pour qu'ils soient bien posés [Medjelekh, El Ganaoui, 2012].

Ouled Ammar, où se trouve la maison en terre et paille, est une petite agglomération située au sud-est algérien à 27,7 km de Barika (chef daira) et à 88 Km de la ville de Biskra. Pour les trois analyses climatique, bioclimatique et microclimatique de la région, l'étude s'est servie de l'interprétation des données météorologiques de la ville de Biskra, et ce, sur une période de onze années ; recueillies auprès de la station météo.

3-1-1. Paramètres climatiques

Le climat de Biskra est assez froid en hiver, chaud et sec en été, caractérisé par de fortes fluctuations thermiques journalières et saisonnières. En été, les températures moyennes journalières maximale et minimale sont de 40,8 °C et 27,6 °C. En hiver, les jours sont en général ensoleillés d'une température moyenne maximale journalière de 17,5 °C et 7,1°C au minimale. Les vents du nord et nord-ouest sont uniformément forts en printemps vers la fin de l'après-midi et en soirée, d'une vitesse maxi de 6,24 m/s atteinte en avril. Les vents de sirocco persistent dans la région sur quelques jours en été. L'humidité relative moyenne minimale est de 16%. On retient que l'air est sec et les cieux clairs. Le rayonnement est intense en été avec un maximum de 357,89h en juillet; les précipitations sont rares l'été comme l'hiver de 28,09 mm en décembre et 0,38 mm en juillet. La Figure II-7 résume les principaux paramètres climatiques de la région. D'après le calcul d'indice d'aridité de De Martonne [De Martonne, 1923 In Guyot, 1999], il s'agit d'un climat hyper aride (dans ce cas $IDM = 4,44 < 5$). L'IDM est donné en fonction de la température moyenne annuelle T_m et, la précipitation totale annuelle P selon l'expression:

$$IDM = \frac{P}{T_m + 10} \quad (II.1)$$

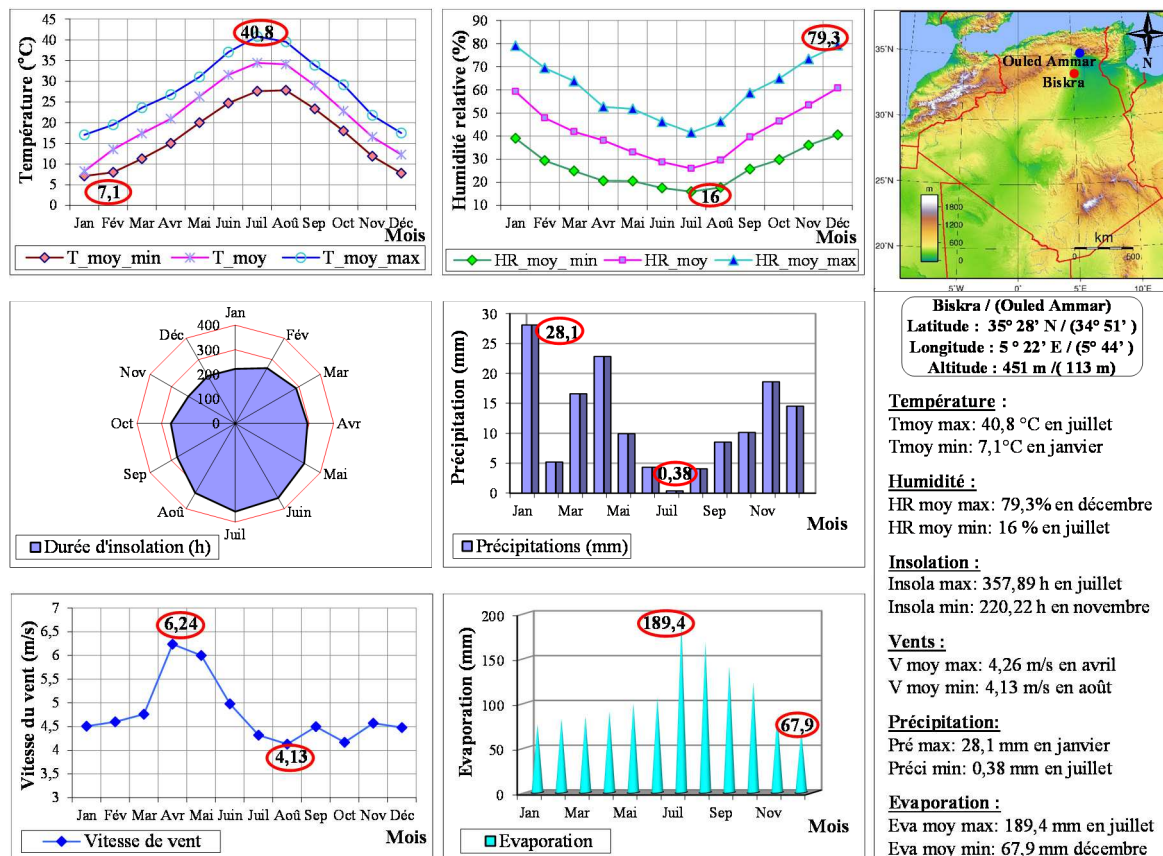


Figure II-7 : Caractéristiques climatiques de la région de « Biskra »

Le graphique ombrothermique de Biskra (Figure II-8), établi à partir de l'indice d'aridité de Gaussen [Bangoul, Gaussen, 1957], permet de distinguer une grande période sèche qui s'étale de février à décembre avec :

$$P = 2T_m \quad (\text{II.2})$$

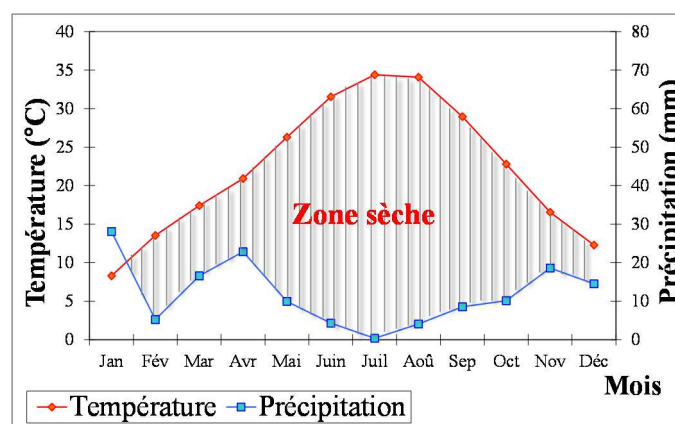


Figure II-8 : Diagramme ombrothermique de Biskra

Même si ce diagramme a été réalisé, à l'origine, pour déterminer les limites botaniques en milieu méditerranéen d'un point de vue naturaliste (du botaniste Gaussen), il reste le seul, depuis un demi-siècle, à décrire un climat d'une région.

3-1-2. Etude bioclimatique

La sévérité du climat se manifeste par une zone de surchauffe importante de juin à octobre, représentée sur le diagramme solaire de la région, Figure II-9. Le diagramme psychrométrique de Scokolay (1980), définit la zone de confort (polygone rose) et les diverses zones de contrôle potentiel, appliqué à Biskra (Figure II-10), préconise le chauffage passif pour les mois assez froids (de novembre à mars) et le chauffage d'appoint pour les mois les plus froids (de décembre à février). L'inertie thermique, la ventilation nocturne (de mai à octobre) et l'humidification de l'air (juillet et août) sont nécessaires à cause de l'aridité du climat. On constate, dans ce cas, que l'enveloppe hygroscopique est indirectement recommandée pour ce type de climat.

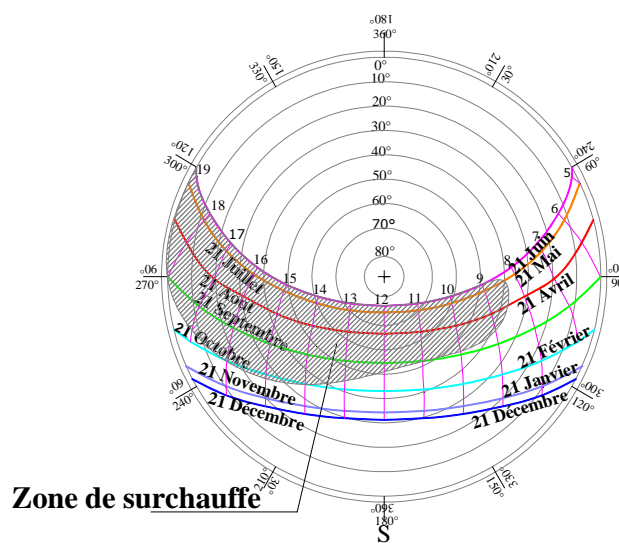


Figure II-9 : Diagramme solaire de Biskra (zone de surchauffe en gris)

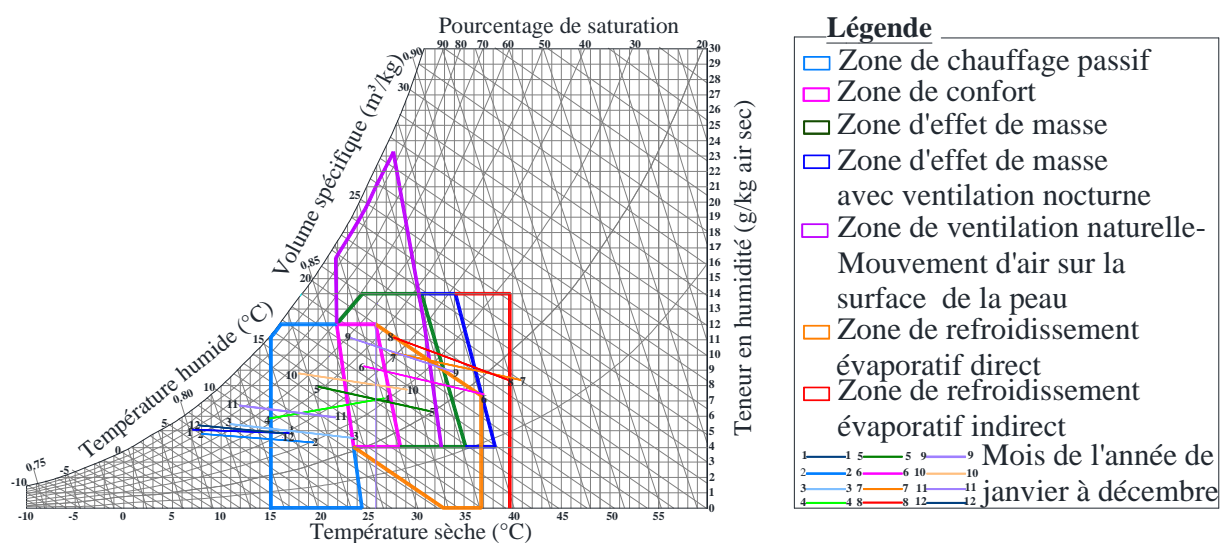


Figure II-10 : Diagramme psychrométrique de la région de Biskra

3-1-3. Microclimat

Le microclimat de l'aire d'étude est de type subsaharien à saharien, où la rareté de la végétation, excepté quelques petites exploitations agricoles près des maisons. Une absence totale de sources d'eau, aucun masque naturel et artificiel, Figure II-11.



Figure II-11 : Environnement de l'aire d'étude « Ouled Ammar »

3-2. Présentation de la maison

La première maison de Barika choisit pour le monitoring est une auto-construction datant de 1960. C'est une maison introvertie, ouverte sur une cour intérieure.



Figure II-12 : Situation de la maison en terre et paille

3-2-1. Enveloppe et matériaux

L'enveloppe est complètement hygroscopique, avec l'utilisation de la terre, matériau prélevé sur site et mélangé à la paille. Les murs sont en moellons de terre et paille, comprimés dans des moules et séchés au soleil. Ils sont revêtus d'un enduit de ciment et plâtre du côté intérieur et laissés sans revêtement du côté extérieur. Le toit se compose d'une couche d'argile entreposée sur des solives et poutres en bois apparentes, Figure II-13.

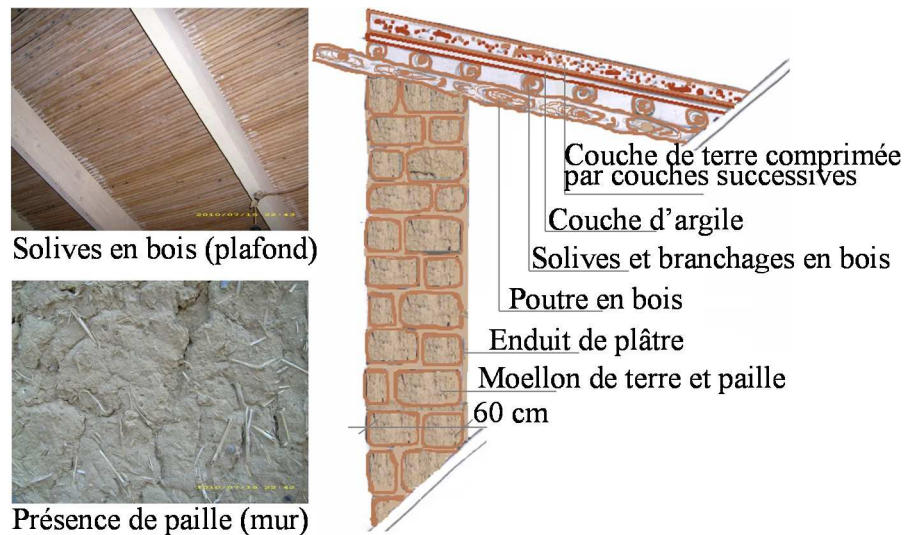


Figure II-13 : Détails de toiture et paroi externe

3-2-2. Moyens de régulation thermique utilisés

La maison n'est dotée que de moyens simples de régulation thermique. Des ventilateurs en plafond fonctionnent le jour en été. Un chauffage d'appoint à gaz butane est utilisé les soirs d'hiver.



Figure II-14 : Moyens de régulation thermique utilisés « maison en terre et paille »

3-3. Monitoring et interprétation

3-3-1. Appareils et points de mesure

Une série de monitoring, sur une durée de 15 mois, a été menée sur la maison, Figure II-15. Des relevés de température et d'humidité relative ont été effectués toutes les 15 minutes dans deux pièces ouvrant sur la cour, à savoir le séjour (orientation S.E) et la chambre 2 (orientation N.O), via l'utilisation de deux « LogTag ». Un troisième capteur a été placé sous abri au niveau de la façade S.E pour le prélèvement de la température et l'humidité relative externes, Figure II-16.

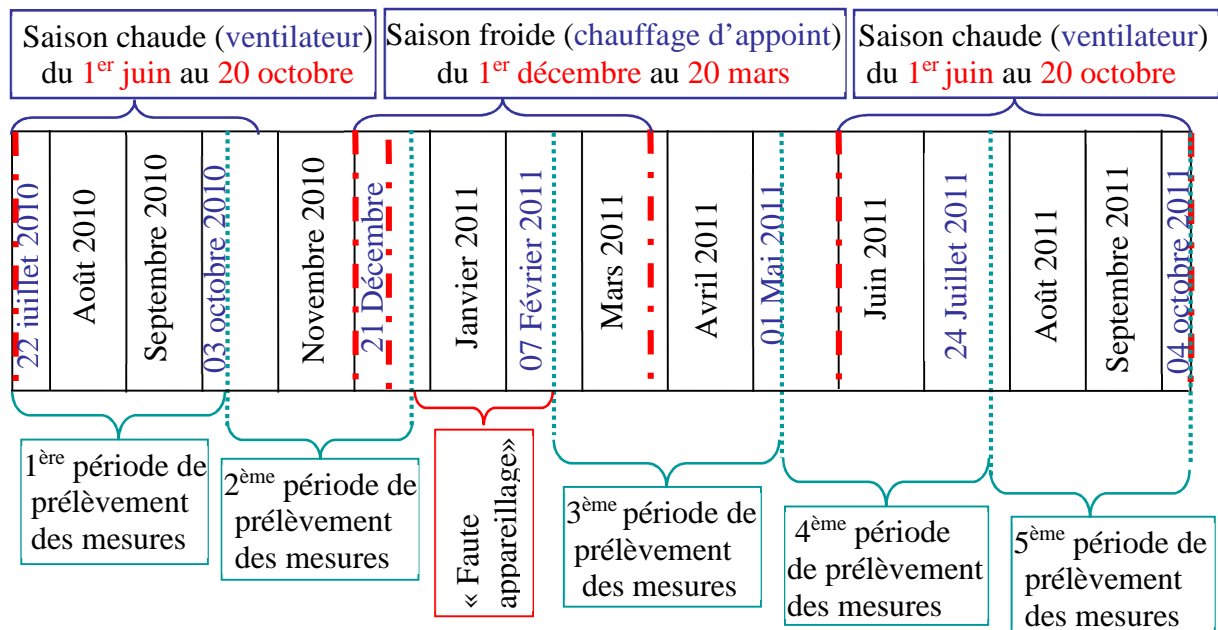


Figure II-15 : Périodes d'enregistrement et de chauffage (Maison en terre et paille)

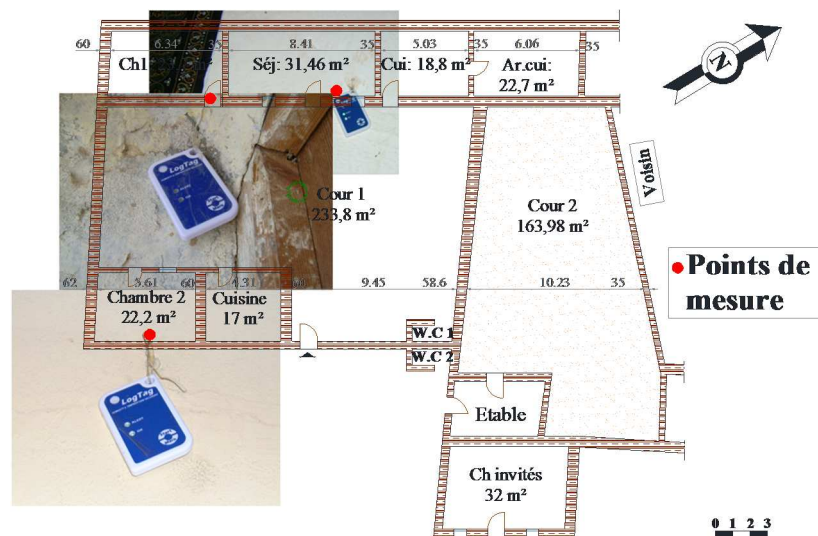


Figure II-16 : Plan de la maison terre/paille et points de mesure

3-3-2. Résultats de mesure

3-3-2-1. Analyse du niveau de confort hygrothermique de la maison

Le confort hygrothermique est l'un des aspects les plus essentiels de la satisfaction des usagers en plus de la consommation d'énergie des bâtiments [Nicol et al, 2012]. Sa notion est directement liée à la température ambiante ressentie, même s'il est comptabilisé un total de six facteurs fondamentaux pour la définition des conditions intérieures du confort tels que le taux

métabolique, l'isolation de la vêtue (clos), la température de l'air, la température radiante, la vitesse de l'air et l'humidité relative [ASHRAE, 2010]. Multiples études ont été réalisées pour connaître les limites du confort hygrothermique sous forme d'indices, chartes bioclimatiques et questionnaires, pour ne citer que quelques-unes : [Givoni, 1978], [Auliciems, Szokolay, 1997], [de Dear, Brager, 2002] [Nicol, Humphrey, 2002]. Dans les bâtiments à chauffage, ventilation et air conditionné (HVAC), l'indice de vote moyen prévisible (PMV) permet de réaliser des prévisions réalistes des conditions intérieures de confort. Cependant, dans les bâtiments naturellement ventilés (cas des maisons choisies dans l'étude), seuls les modèles adaptatifs fournissent des prévisions précises.

Ces modèles, parmi les normes thermiques actuelles de l'environnement bâti, offrent une plus grande souplesse de correspondance des températures intérieures de confort relatives au climat extérieur, en particulier dans les bâtiments naturellement ventilés. On suggère que les occupants sont tolérants avec une plage plus large de températures, tolérance expliquée par la combinaison de deux adaptations comportementale et psychologique [de Dear, Brager, 2002], [Nicol, Humphreys, 2010], [Deuble, de Dear, 2012]. Les normes d'adaptation sont ainsi considérées comme les plus appropriées pour définir le confort dans les bâtiments à faible consommation énergétique [de Dear, Brager, 2002], [Nicol, Humphreys, 2002], [Kwok, Rajkovich, 2010], [Nicol et al, 2012]. Les modèles adaptatifs sont employés dans la norme 55 d'ASHRAE [ASHRAE, 2010] pour les espaces naturellement conditionnés et dans la norme européenne (EN) 15251 [BSI, 2008] pour les bâtiments sans systèmes de refroidissement thermodynamiques.

La température de confort de Dear et Brager, (2002), adoptée dans la norme (ASHRAE 55-2010), prévoit une bande de température devant être appliquée de manière uniforme à travers l'espace et le temps. Cette norme est considérée comme universellement applicable à tous types de bâtiments, zones climatiques et populations car les données météorologiques de la base de données « RP-884 », qui ont servi à cette norme, sont parvenues de quatre continents avec un large éventail de zones climatiques [de Dear, Brager, 1998], même si aucun climat africain n'a été renseigné dans cette base de données.

La norme ASHRAE a donc été appliquée pour l'évaluation du confort dans le d'étude ; à savoir:

$$T_c = 0,31 \times T_m + 17,8 \quad (\text{II.3})$$

T_c désigne la température de confort et T_m la température moyenne mensuelle.

Si on prend le diagramme de Szokolay, Figure II-10, le polygone de confort annuel de la région de Biskra est défini par quatre points et un point de neutralité ($T_{c(annuelle)}$) central. Les coordonnées des points sont transcrites dans le tableau II-3.

Tableau II-3 : Coordonnées des sommets du polygone de confort thermique annuel de la région de Biskra

| T (°C) | HR (%) | Hs (g/kg) |
|-------------------|--------|-----------|
| $T_{c(annuelle)}$ | 24,7 | 50 |
| T_1 | 21,9 | 67 |
| T_2 | 25,9 | 53 |
| T_3 | 23,5 | 22 |
| T_4 | 28,3 | 16 |

Une plage de températures, au voisinage de la température de confort T_c , correspond à l'acceptabilité thermique de 90 et de 80 %. Arithmétiquement parlant, atteignant en moyenne ces largeurs de zone de confort à travers tous les bâtiments naturellement ventilés, il est produit une bande moyenne de zone de confort de 5 °C pour l'acceptabilité de 90 %, et 7 °C pour l'acceptabilité de 80 %, les deux zones étant portées par la température optimale de confort [Kruger, Givoni, 2008].

L'équation d'ASHRAE donne les températures mensuelles de confort pour Biskra de 21,3 °C l'hiver et 28,1 °C l'été. Pour l'acceptabilité de 80%, les zones de confort peuvent être prolongées de +/-3,5 K ce qui donne une gamme adaptative de confort entre 17,8 et 31,6 °C au-dessus du cycle annuel. Pour l'acceptabilité de 90 %, dont les zones de confort sont prolongées de +/-2,5 K, la gamme adaptative de confort est comprise entre 18,8 et 30,6 °C au-dessus du cycle annuel.

Afin de vérifier l'effet du microclimat et pour éviter les difficultés qui surgissent dans le choix des données climatiques fiables, les températures de confort ont été également calculées avec les données extérieures enregistrées au niveau de la maison d'Ouled Ammar. Les températures de confort de l'aire d'étude ne diffèrent pas de celles utilisées avec les données météorologiques de Biskra. Le tableau II-4 récapitule les valeurs des températures de confort thermique mensuelles et saisonnières calculées pour les régions de Biskra et d'Ouled Ammar, ainsi que les limites saisonnières de confort, supérieures et inférieures avec 80 % et 90 % d'acceptabilité.

Tableau II-4 : Températures de confort thermique mensuel de Biskra et O. Ammar selon la norme ASHRAE

| Mois | $T_c(\text{Déc})$ (°C) | $T_c(\text{Janv})$ (°C) | $T_c(\text{Fév})$ (°C) | $T_c(\text{Mars})$ (°C) | $T_c(\text{Avr})$ (°C) | $T_c(\text{Mai})$ (°C) | $T_c(\text{Juin})$ (°C) | $T_c(\text{Juil})$ (°C) | $T_c(\text{Août})$ (°C) | $T_c(\text{Sep})$ (°C) | $T_c(\text{Oct})$ (°C) | $T_c(\text{Nov})$ (°C) |
|--|------------------------------|----------------------------|---|----------------------------|---------------------------|---------------------------|--|----------------------------|----------------------------|---------------------------|--|---------------------------|
| T_{c_Biskra} | 21,6 | 20,4 | 22 | 23,2 | 24,3 | 26 | 27,6 | 28,5 | 28,4 | 26,8 | 24,9 | 22,9 |
| $T_{c_O_Amm}$ | 21,6 | 20,4 | 22 | 22,7 | 24,7 | 25 | 27,2 | 28,7 | 28,7 | 27,4 | 24,7 | 22,6 |
| $T_{c(\text{Hiver})}(\text{Biskra})$ (°C) | 21,3 | | $T_{c(\text{Maison_Biskra})}$ (°C) | | 24,7 | | $T_{c(\text{Eté_Biskra})}$ (°C) | | 28,1 | | $T_{c(\text{Maison_Biskra})}$ (°C) | |
| $T_{c(\text{Hiver})}(\text{O. Ammar})$ (°C) | | | | | | | | | | | | |
| $T_{c(\text{Hiver})}(\text{O. Ammar})$ (°C) | 21,3 | | $T_{c(\text{Maison})}(\text{O. Ammar})$ (°C) | | 24,5 | | $T_{c(\text{Eté})}(\text{O. Ammar})$ (°C) | | 28,2 | | $T_{c(\text{Maison_O. Ammar})}$ (°C) | |
| Saisons / limites confort | Hiver | | Mi-saison | | Eté | | | | | | | |
| | Biskra | | O. Amm | | Biskra | | O. Amm | | Biskra | | O. Amm | |
| | Limite sup (°C) accep 80% | | 24,8 | | 24,8 | | 28,2 | | 28 | | 31,6 | |
| | Limite inf (°C) Accep 80% | | 17,8 | | 17,8 | | 21,2 | | 21 | | 24,6 | |
| | Limite sup (°C) accep 90% | | 23,8 | | 23,8 | | 27,2 | | 27 | | 30,6 | |
| | Limite inf (°C) Accep 90% | | 18,8 | | 18,8 | | 22,2 | | 22 | | 25,6 | |

D'après les limites calculées pour Biskra, les espaces intérieurs en saison d'été (séjour et chambre) se trouvent dans la plage de confort, avec la limite supérieure d'acceptabilité 80 % (Figure II-17) et la dépassent durant les périodes de canicule.

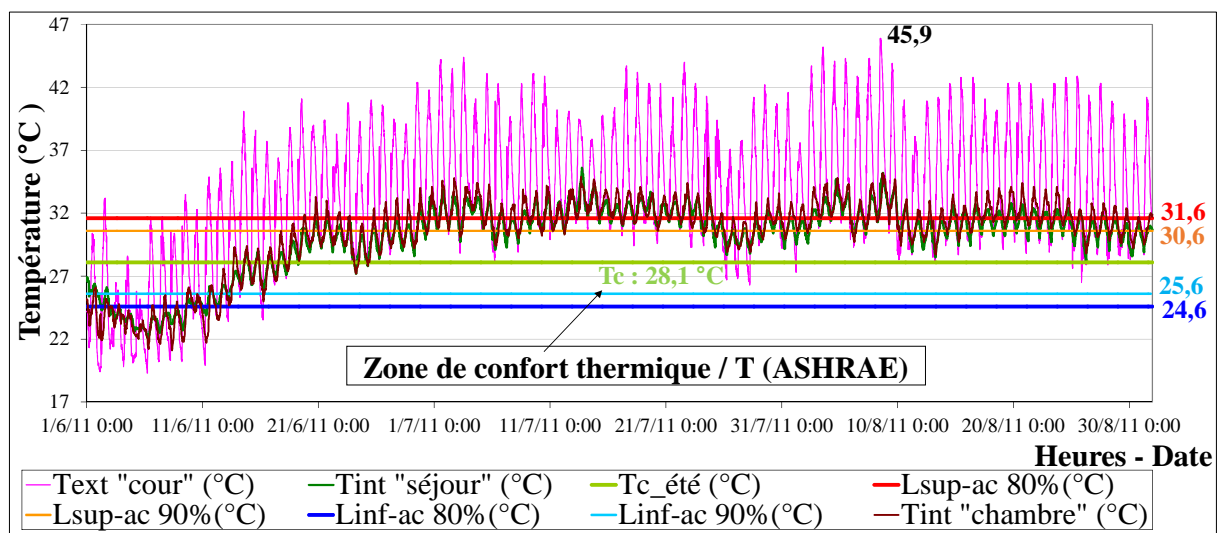


Figure II 17 : Comparaison des températures intérieures dans le séjour S.E et la chambre N.O avec les limites de confort/T ASHRAE dans la région, période été (du 01/6 au 31/8/2011)

Il est envisageable pour ce type de climat que les limites inférieures peuvent être négligées. Elles sont beaucoup inférieures à la température moyenne de la région (T_c : 24,6 ou 25,6 < T_m 33,5°C). Les études montrent que les populations en climats chauds/secs s'adaptent aux températures opératives neutres plus élevées car l'humidité relative intérieure influence l'équation adaptative [Toea, Kubota, 2013]. En revanche, la sensation thermique des habitants en climats humides (Hong Kong) est sensible à la température et à la vitesse de l'air et non à l'humidité relative [Chowa et al, 2010]. Dans ce type de climat, la limite inférieure du confort n'a pas été atteinte pour les bâtiments naturellement aérés [Chyee Toea, Kubota, 2013]. Une plage de confort thermique entre 26-32,45°C a été trouvée au-dessus des limites 23-26°C fixées par les normes indiennes [Indraganti, 2010 a-b]. En climats chaud/secs et chaud / humides, les équations adaptatives étaient analogues avec les coefficients approximatifs de régression de 0.6, qui étaient presque deux fois ceux donnés par les normes d'ASHRAE 55 et européennes EN15251 [Toea, Kubota, 2013]. Ceci veut dire que les normes générales ne peuvent être appliquées pour tous les climats.

Or, l'application du modèle adaptatif de la norme européenne (EN) 15251 [BSI, 2008] donne des plages de confort plus élargies. Les climats chauds européens, comme celui de la Grèce, qui ont servi de base de données pour cette norme, peuvent être considérés comme semblables aux climats algériens. En employant l'équation empirique appliquée dans la norme européenne, la température de confort mensuelle T_c est donnée en fonction de la température moyenne T_m par :

$$T_c = 0,33 \times T_m + 18,8 \quad (\text{II.4})$$

L'équation donne les températures de confort thermique à Biskra de 22,5 °C l'hiver et 29,8 °C l'été. Les zones de confort peuvent être prolongées de +/-4K en considérant un niveau modéré acceptable attendu pouvant être utilisé dans les bâtiments existants [BSI, 2008]. Ceci donne une gamme adaptative de confort comprise entre 18,6 et 33,8 °C au-dessus du cycle annuel. D'après ces limites, l'espace intérieur (chambre, séjour) est jugé acceptable en été avec une limite supérieure de confort légèrement dépassée les jours de canicule, et même potentiellement en dessous de la limite inférieure de confort les autres jours, si la ventilation nocturne est maintenue, Figure II-18. Ceci justifie la bonne sensation de confort thermique signalée par les personnes vivant dans des maisons en terre/paille à travers le sud algérien [Zerhouni et al, 2001].

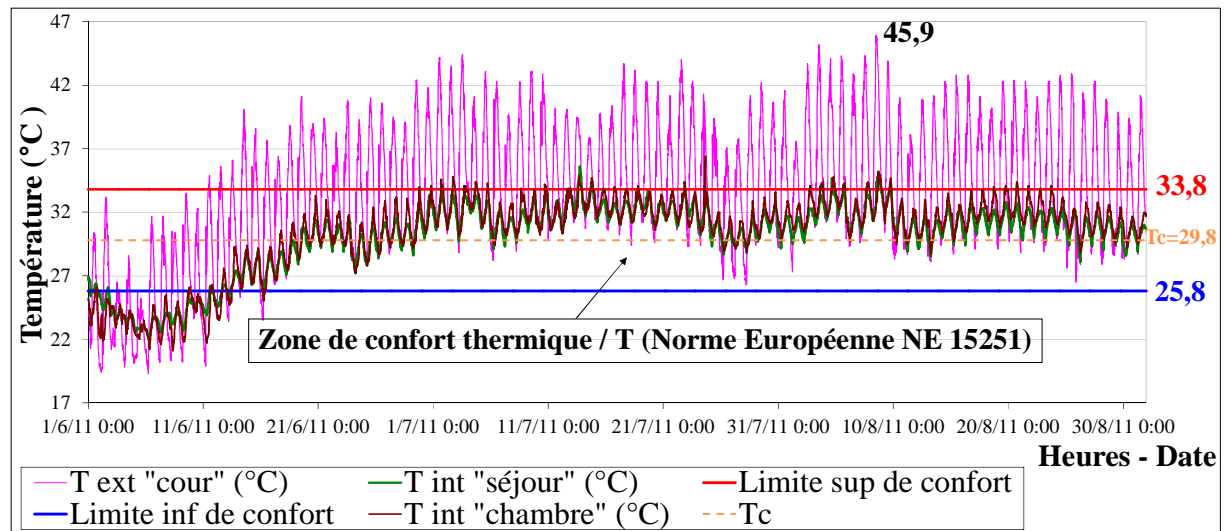


Figure II-18 : Comparaison des températures intérieures dans le séjour S.E et la chambre N.O avec les limites de confort/T de la norme européenne (EN 15251), saison d'été (du 01/06 au 31/08/2011) « maison en terre et paille »

Le tableau II-5- reprend les valeurs des températures de confort mensuelles et saisonnières calculées avec les limites saisonnières de confort, supérieures et inférieures pour la région de Biskra et Ouled Ammar, selon la norme européenne.

Tableau II-5 : Températures de confort de Biskra et O. Ammar selon la norme européenne

| Mois | $T_c(Dec)$ (°C) | $T_c(Janv)$ (°C) | $T_c(Fév)$ (°C) | $T_c(Mars)$ (°C) | $T_c(Avr)$ (°C) | $T_c(Mai)$ (°C) | $T_c(Juin)$ (°C) | $T_c(Juil)$ (°C) | $T_c(Août)$ (°C) | $T_c(Sep)$ (°C) | $T_c(Oct)$ (°C) | $T_c(Nov)$ (°C) | | | |
|------------------------------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|----------------------------|---------------------|---------------------|--------------------------------|--------------------|--------------------|--|------|--|
| T_{c_Biskra} | 22,6 | 21,5 | 23,3 | 24,5 | 25,7 | 27,5 | 29,2 | 30,2 | 30 | 28,4 | 26,3 | 24,3 | | | |
| $T_{c_O_Amm}$ | 22,6 | 21,5 | 23,3 | 24 | 26,1 | 28,5 | 28,8 | 30,4 | 30,3 | 29 | 26,1 | 24 | | | |
| $T_{c(Hiver)(Biskra)}$ (°C) | | | 22,6 | $T_{c(Msaison_Biskra)}$ (°C) | | 26,1 | $T_{c(Eté_Biskra)}$ (°C) | | 29,8 | $T_{c(Msaison_Biskra)}$ (°C) | | 26,1 | | | |
| $T_{c(Hiver)(O.Ammar)}$ (°C) | | | 22,6 | $T_{c(Msaison)(O.Ammar)}$ (°C) | | 25,9 | $T_{c(Eté)(O.Ammar)}$ (°C) | | 29,9 | $T_{c(Msaison_O.Ammar)}$ (°C) | | 25,9 | | | |
| Saisons / limites confort | | | | Hiver | | | Mi- saison | | | Eté | | | | | |
| | | | | Biskra | | O. Amm | Biskra | | O. Amm | Biskra | | O. Amm | | | |
| Limite de confort sup (°C) | | | | 26,2 | | 26,2 | | 30,1 | | 29,9 | | 33,8 | | 33,9 | |
| Limite de confort inf (°C) | | | | 18,6 | | 18,6 | | 22,1 | | 21,9 | | 25,8 | | 25,9 | |

D'autre part, les espaces intérieurs sont couverts de revêtements perméables. Ces derniers peuvent être considérés comme une stratégie passive de contrôle des conditions intérieures et, par conséquent, peuvent avoir des implications sur la perception du confort thermique, la qualité de l'air intérieur et les économies d'énergie.

Un modèle établi par [Orosa, Oliveira, 2011], combinant l'indice de PMV avec les modèles adaptatifs, a permis de considérer les températures intérieures et l'humidité relative avec la température neutre, et prennent en compte les revêtements. Ils ont suggéré des températures neutres différentes dans les modèles adaptatifs. Cet avantage a pu être appliqué pour obtenir des économies d'énergie car il nécessite une différence de 1 °C pour les conditions intérieures. Les espaces avec revêtements perméables présentent des conditions intérieures plus proches de la neutralité thermique, et ce, avec des économies d'énergie correspondantes.

Pour l'humidité relative, une plage de **30 à 60 %** est recommandée par la norme 55-2004 d'ASHRAE, (2010). La comparaison avec ces limites montre que les espaces intérieurs en été sont également jugés confortables. L'humidité relative extérieure est en dessous de la limite inférieure 30 % à cause de l'aridité du climat, Figure II-19.

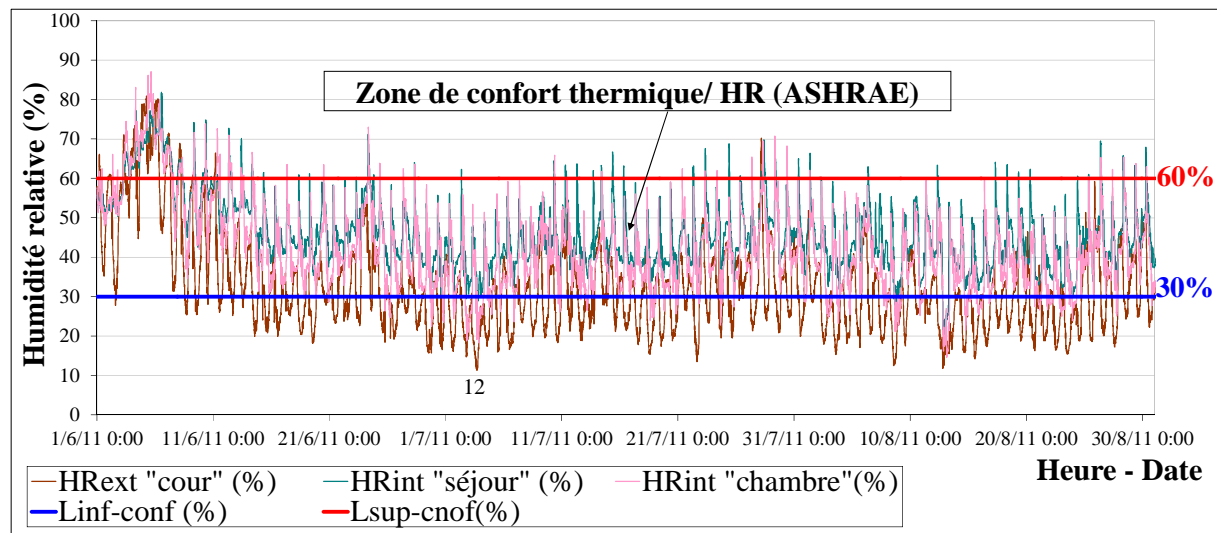


Figure II-19 : Comparaison de l'humidité relative intérieure dans le séjour et la chambre avec les limites de confort / HR de ASHRAE dans la région : saison d'été du 01/6 au 31/8/2011« maison en terre et paille»

3-3-2-2. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période été

La température ambiante du séjour offre une stabilité avec une amplitude moyenne journalière de 3,8 K. Elle chute en fin de journée et suit la température externe du fait du free-cooling. Un amortissement de 10,6 K a été enregistré après 4h 45 min entre le pic de température extérieure (46,4°C au niveau de la cour) et celui de la température intérieure (35,8 °C, Figure II-20). Les apports ont donc bien été amortis et déphasés dans le temps. L'enveloppe en terre a été montrée qu'elle est capable de pallier aux problèmes de surchauffes de la région [Ould-Henia, 2003].

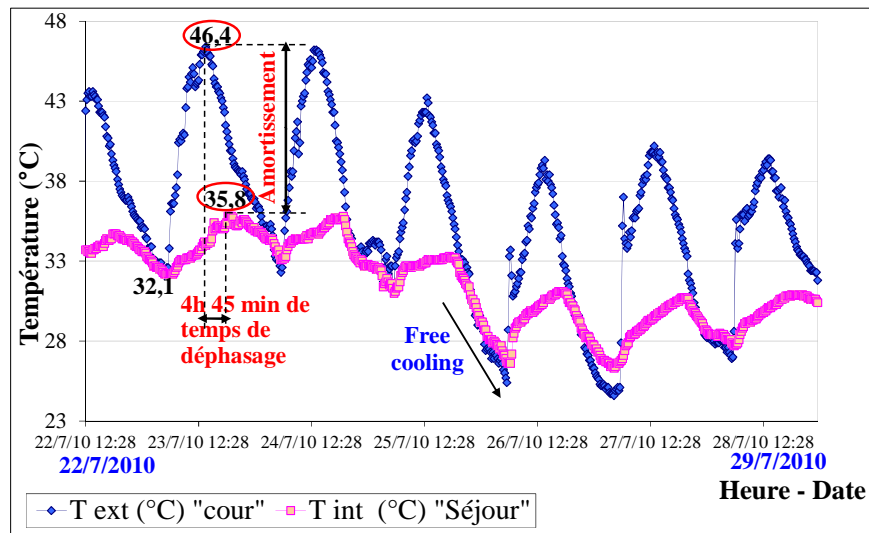


Figure II-20 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de séjour, semaine de canicule « maison en terre et paille »

Malgré qu'il ne s'agisse pas de la même orientation ni de la même épaisseur de murs, la chambre se comporte comme le séjour, une bonne atténuation de l'onde thermique le jour et le profit du free-cooling la nuit, Figure II-21. Une amplitude de 10K a été mesurée après 5h 45min entre les températures externe et ambiante. Les phénomènes de déphasage/amortissement sont bien évidemment dus à la forte inertie thermique. L'amortissement est causé par l'effet isolant du composant terre/paille. C'est un matériau poreux et hygroscopique qui combine, à la fois, une macroporosité due à l'arrangement imparfait des particules de terre et une microporosité des fibres végétales de la paille [Medjelekh et al, 2013]. Le déphasage est surtout dû à l'effet de l'épaisseur importante des murs (séjour 60 cm, chambre 45cm) et de la toiture 45cm.

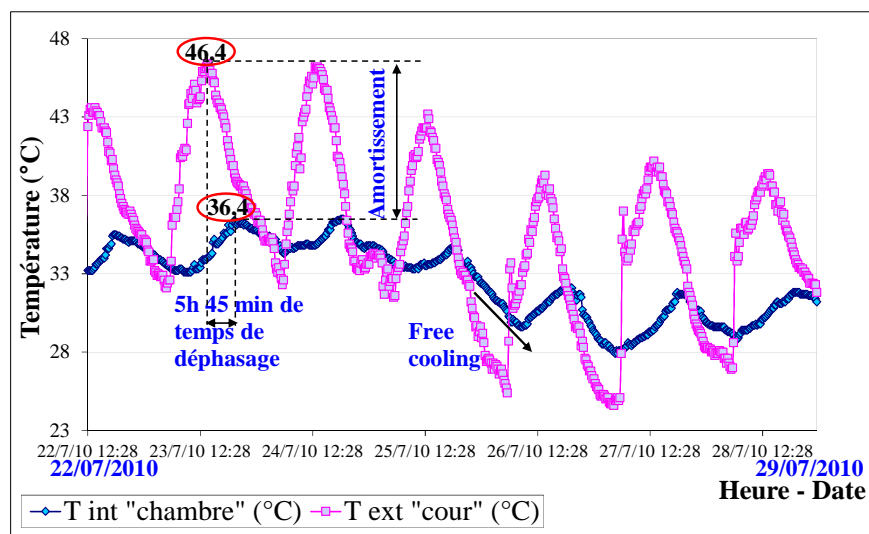


Figure II-21 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de la chambre semaine de canicule « maison en terre et paille »

En réalité, la toiture est l'un des éléments du bâtiment les plus sensibles dans les zones à faible latitude (climats chauds). Elle est exposée à la radiation solaire la plus grande partie du jour avec une forte incidence. Elle représente 60 % des apports de chaleur. Dans le cas étudié, la toiture étant épaisse (45 cm) et inclinée de 20°, elle permet de réduire le facteur solaire. Elle est composée d'une couche en terre et branchages déposée sur des solives en bois, Figure II-13. Une grande surface de bois massif exposée contribue à l'amortissement des variations intérieures de la température [Hameury, Lundström, 2004].

La Figure II-22 montre sur une séquence quotidienne, l'effet de l'inertie thermique dans l'écrasement des températures maximales le jour. La nuit, la température intérieure est très proche de celle de l'extérieur grâce au free-cooling nocturne. La chaleur dissipée, à l'intérieur le jour, est évacuée la nuit avec l'ouverture des fenêtres donnant sur la cour.

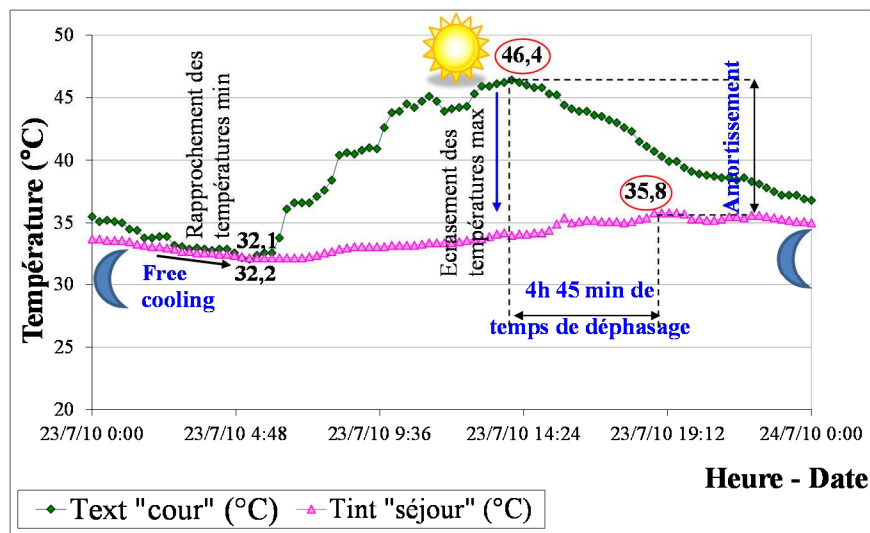


Figure II-22 : Variation horaire journalière de la température extérieure et intérieure dans le séjour S.E : période d'été, journée de canicule « maison en terre et paille »

La comparaison des températures moyennes journalières (variations du cycle jour/nuit lissées à raison d'un point toutes les 24 h) intérieures et extérieures de la saison d'été, fait remarquer qu'il s'agit d'un effet d'inertie quotidienne, Figure II-23. L'inertie thermique séquentielle sur une période de plusieurs jours, caractérise l'amortissement de l'onde séquentielle de chaleur, résultant des effets conjugués de l'évolution de la température extérieure et de l'ensoleillement en saison chaude. Dans cette maison, le phénomène peut être attribué à l'effet de la ventilation nocturne et à l'effet hydrique sur le thermique de l'enveloppe. L'inertie séquentielle ne dépasse pas un jour, alors que pour des enveloppes à forte inertie peuvent atteindre 12 jours (exemple, cas du béton plein).

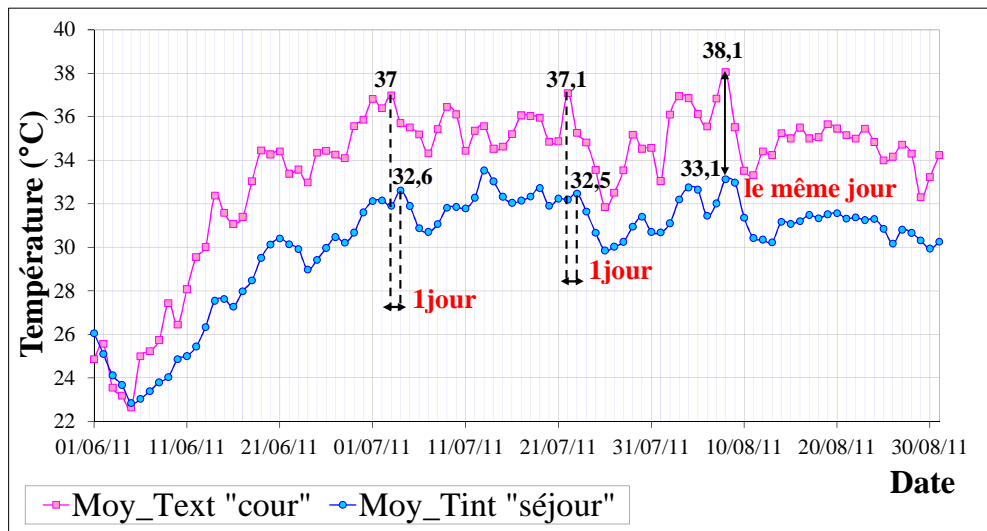


Figure II-23 : Variation des températures moyennes journalières intérieure et extérieure :
séjour S.E, saison d'été « maison en terre et paille »

En comportement hydrique, du fait de l'aridité du climat, l'humidité relative extérieure est en dessous de 20 %HR. Dans le séjour, l'humidité relative est nettement supérieure (Figure II-24) puisque la terre régule bien les conditions intérieures. L'étude des propriétés hygrothermiques des briques de terre a confirmé leur capacité à réguler l'humidité interne [Cagnon et al, 2014]. D'autre part, l'élévation de la température ambiante induit l'abaissement de l'humidité interne, Figure II-25.

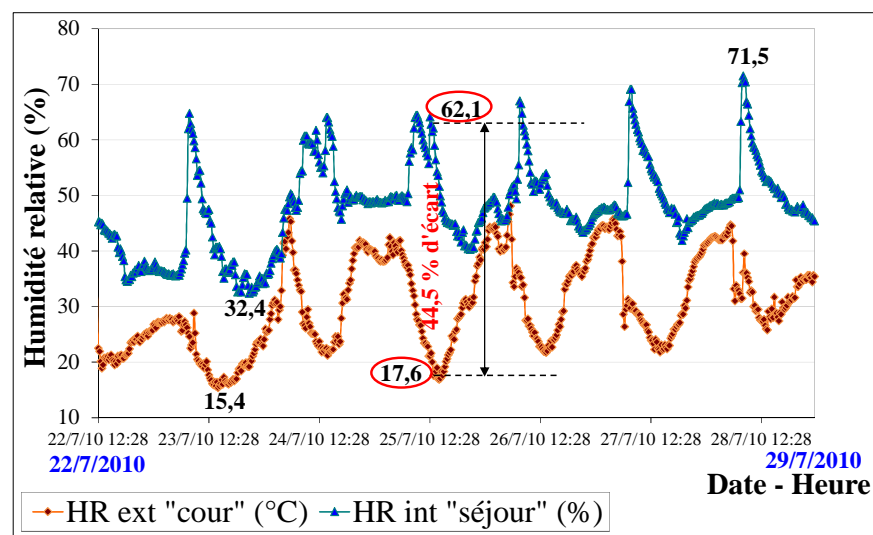


Figure II-24 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de
séjour, période estivale « maison en terre et paille »

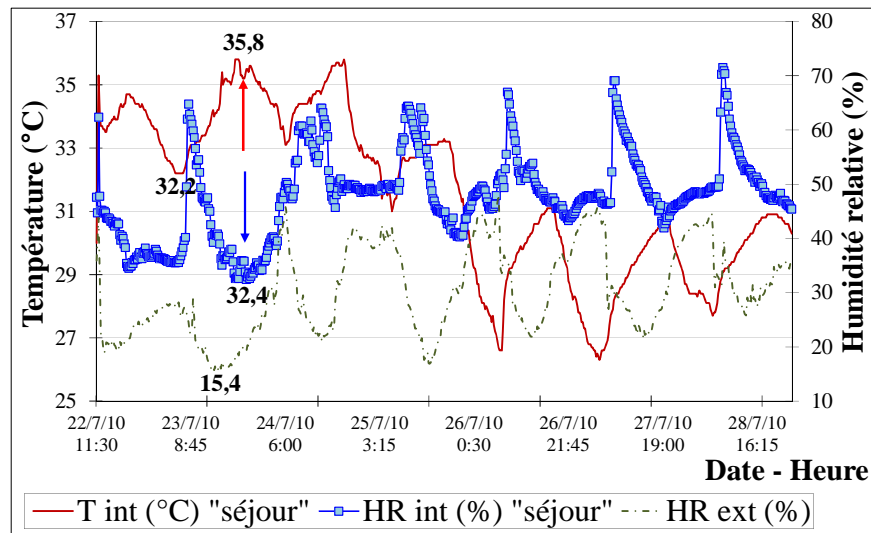


Figure II-25 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure, extérieure et de la température intérieure : cas de séjour, période estivale « maison en terre et paille »

Quant à l'humidité spécifique interne, elle est nettement supérieure à celle de l'extérieur à cause des charges internes d'humidité (dégagement métabolique, respiration). Un écart max de 09,35 g/Kg a été enregistré entre les deux humidités spécifiques, Figure II-26.

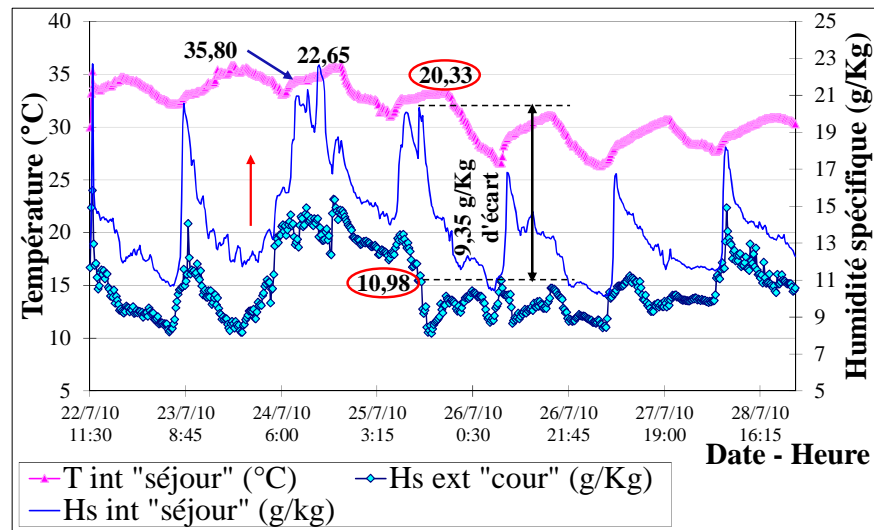


Figure II-26 : Variation horaire de l'humidité spécifique extérieure, intérieure et la température intérieure : cas de séjour, période été « maison en terre et paille »

Généralement, les pics d'humidité spécifique intérieure sont atteints la matinée. En admettant qu'une maison passive exige des utilisateurs actifs, pour des raisons de rafraîchissement, les usagers affirment qu'ils versent 4 seaux d'eau de 20 litres et qu'ils laissent pendant une heure ou plus pour assécher le sol après. De petites répliques succèdent à chaque

fois les pics dans l'humidité spécifique intérieure (16,82 g/kg). Les tâches ménagères effectuées entre 9 h et 11h sont suivies d'une période de ventilation (ventilateurs en marche) qui fait chuter l'humidité spécifique interne (13,41 g/kg). Juste après la fermeture des fenêtres, un autre pic (14,7g/kg) est atteint, causé par une restitution de la vapeur d'eau des matériaux hygroscopiques de l'enveloppe. Un taux de 2,12 g/kg a été enregistré après 5h 45min, Figure II-27. Cette quantité d'eau diffusée, même faible, améliore la sensation du confort thermique des occupants.

L'effet régulateur ou « tampon » hydrique des matériaux hygroscopiques est bien connu et a fait l'objet de nombreuses études, surtout sur les matériaux à base bois [Simonson, 2002], [Hameury, Lundström, 2004], [Osanyintola, Simonson, 2006], [Evrard, De Herde, 2009], [James, et al, 2010]. Zhang, et al, (2012) ont pu obtenir environ 50 % d'effet d'adsorption et 20% d'effet de désorption d'humidité dans une salle de séjour de 48 m³ de volume. La pièce a été contrôlée par un taux constant de changement d'air (0.5 (1/h)) et revêtue d'un matériau hygroscopique au plafond et au mur.

Lorsque la teneur en eau varie au sein du matériau, d'autres caractéristiques (notamment la conductivité thermique) peuvent légèrement varier. De plus, lorsque l'humidité relative varie, la teneur en eau varie aussi au sein du matériau. Ainsi, pour la paille, on a pour 50 % HR, une teneur en eau de l'ordre de 15% en masse. Elle atteint 25 % pour 90 %HR [CEBTP, FFB, ADEME, 2004]. L'analyse numérique qualitative a prouvé que le potentiel de stockage d'humidité dans le matériau à base de bois peut réduire l'humidité maximale pendant la nuit, ainsi enlevée par la ventilation pendant le jour suivant [Simonson et al, 2001].

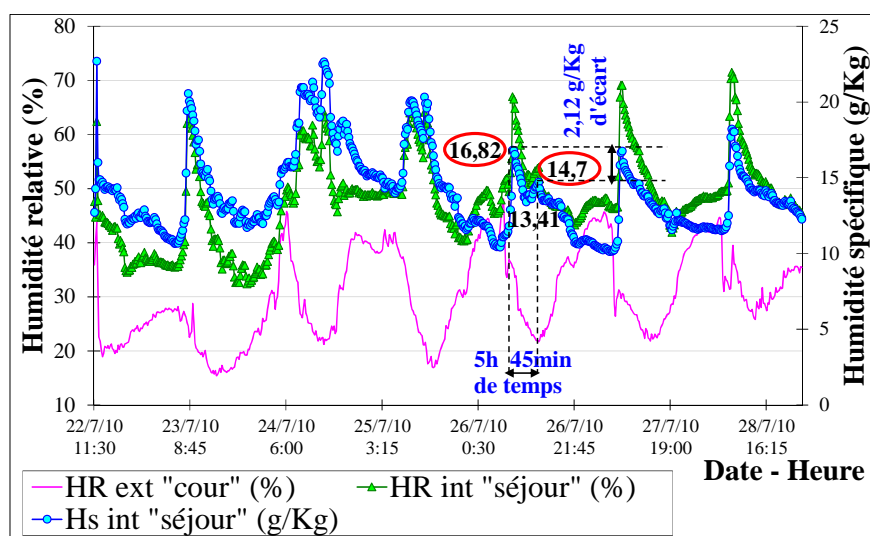


Figure II-27 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure, extérieure et l'humidité spécifique intérieure : cas de séjour, période estivale « maison en terre et paille »

3-3-2-3. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période hiver

Comparée à celle de l'extérieur, la température intérieure est plus stable avec une amplitude moyenne max de 4,84 °C. Elle chute le soir après 21h-22h suite à l'arrêt du chauffage d'appoint. Ce dernier n'est mis en marche qu'en fin d'après-midi et on le déplace d'un endroit à l'autre. Malgré ça, un écart max de 11,3°C a été enregistré entre la température intérieure et celle de l'extérieur, Figure II-28. Ceci s'explique par l'effet de l'inertie thermique de l'enveloppe qui évite les chutes trop brutales de la température en hiver. L'énergie disponible (gains solaires et les gains internes le jour) est stockée dans la masse et est restituée plus tard à l'intérieur lorsqu'on a besoin. Selon Karlsson et al, (2013) la forte inertie améliore le confort et le comportement thermique des bâtiments chauffés en continu. Le chauffage pourvoira au risque et maintiendra la température de confort s'il y aura un refroidissement potentiel. De faibles températures ont été enregistrées le matin, causées par la ventilation et l'arrêt de chauffage.

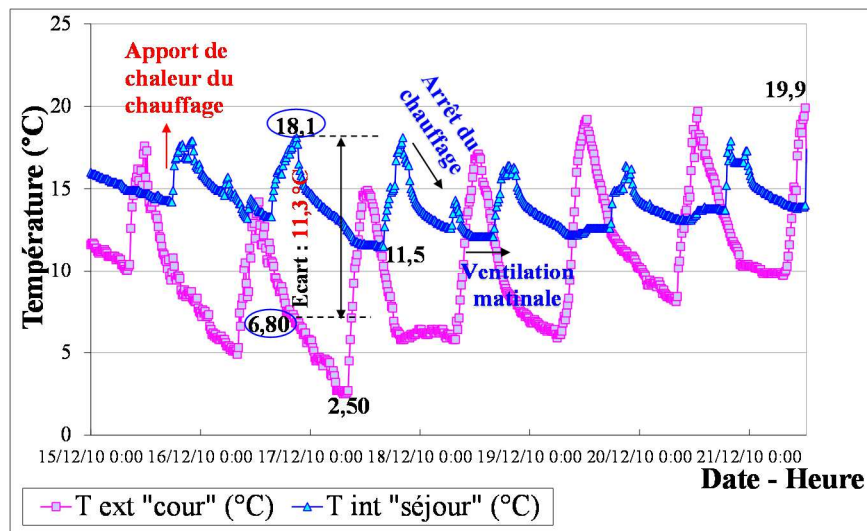


Figure II-28 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas du séjour, période hivernale « maison en terre et paille »

La température ambiante marque aussi de petites élévations l'après-midi suite aux tâches ménagères, Figure II-29. L'effet de l'inertie hydrique a certainement accéléré le transfert de masse. Plus particulièrement, les échanges convectifs par changement de phase en surface de la paroi ont généré des absorptions (l'eau de ménage) puis des émissions de chaleur latente procurant un petit apport additionnel de chaleur. Les recherches montrent une élévation de 1,5°C à 2°C de la température de l'air, due à la production de la vapeur [Yoshino et al, 2009]. A cause de la capacité hygroscopique des particules de terre et paille, le mur externe, non revêtu, tend à réguler l'humidité relative dans son environnement. Il libère donc l'eau quand sa

température augmente et vice-versa. Ce phénomène est souvent désigné sous le nom de «vapeur conduite par le soleil ». Rejoignant l'avis de Piot et al. (2011), la vapeur d'eau est non seulement conduite par le rayonnement solaire mais également par variation de la température de surface.

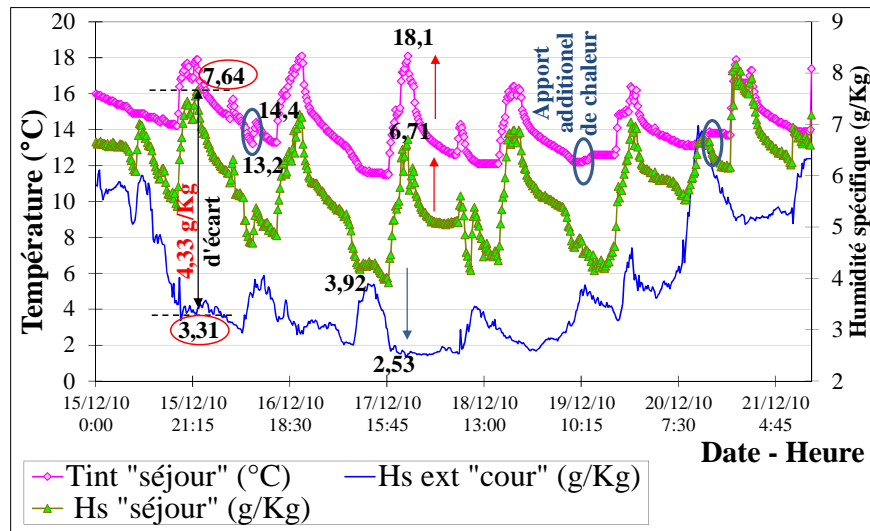


Figure II-29 : Variation horaire de la température intérieure et l'humidité spécifique intérieure et extérieure : cas du séjour, période hivernale « maison en terre et paille »

Malgré qu'il s'agisse de l'hiver, l'humidité relative intérieure dépasse celle de l'extérieur avec un écart max de 26,3% (Figure II-30). Quelques dépassements de l'humidité extérieure ont été enregistrés la nuit, lorsque la température est plus fraîche. L'humidité relative intérieure enregistre ses pics le matin (lors des tâches ménagères) entre 9h et 12h. Le soir, l'utilisation du chauffage assure sa stabilisation. Pourtant, durant la nuit, elle augmente par l'apport de charges internes (évapotranspiration des occupants) et la désorption de l'enveloppe. La part de l'occupant est plus importante, produisant autour de 400g/h de vapeur en 8h de sommeil dans une pièce de 75m² de mur, cas du béton de chanvre, qui ne libèrera en 6 mois que ~12 g/h [Evrard, 2008] (Voir Tableau A-2-5 en annexe A : Membres et scénarios d'occupation par jour de semaine). Selon Liu et al. (2013), plus l'amplitude de la variation d'humidité relative intérieure est grande, plus est la quantité d'absorption-désorption d'humidité de surface interne.

Par ailleurs, l'effet Soret ou la thermodiffusion peut aussi induire un transfert d'eau liquide en parallèle avec le gradient de température (du chaud vers le froid). D'après Peuhkuri et al. (2008), la contribution du flux massique, dû au gradient thermique, peut dépasser 30% du flux massique. Il existe également des possibilités de diffusion de surface, générée par un gradient de teneur en eau, d'être en opposition avec le gradient de température [Samri, 2008]. De ce fait, les phénomènes sont multiples, dont on ne peut juger de la part de chacun à part.

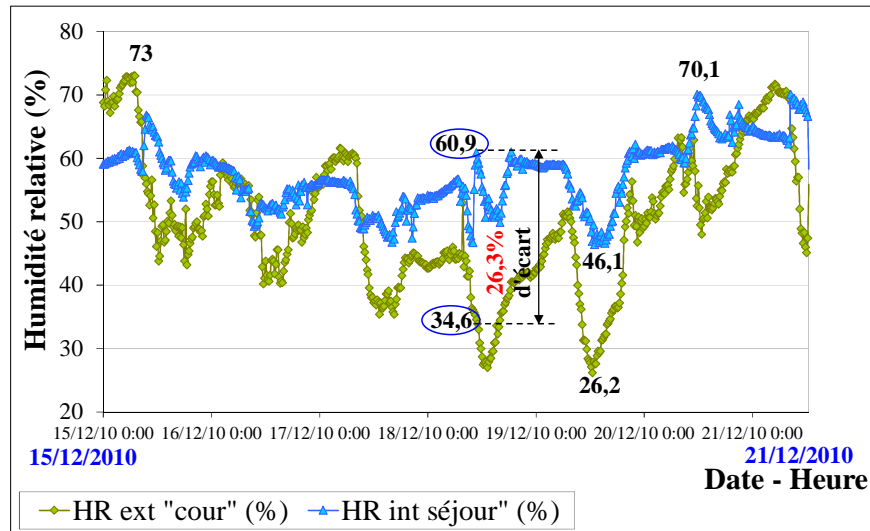


Figure II-30 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de séjour, période hiver « maison en terre et paille »

3-3-2-4. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période mi-saison

Durant la mi-saison, la température ambiante se trouve dans les limites de confort préconisées pour la région. Elle suit la température extérieure avec une bonne atténuation de l'onde thermique après un long temps de déphasage (effet de l'inertie thermique), Figure II-31. A cause de l'aridité du climat, des charges internes et de l'inertie hydrique de l'enveloppe, l'humidité spécifique intérieure est plus élevée qu'à celle d'extérieur, d'un écart max de 4,72 g/Kg, Figure II-32. Pareillement, l'humidité relative ambiante dépasse celle de l'extérieur, Figure II-33.

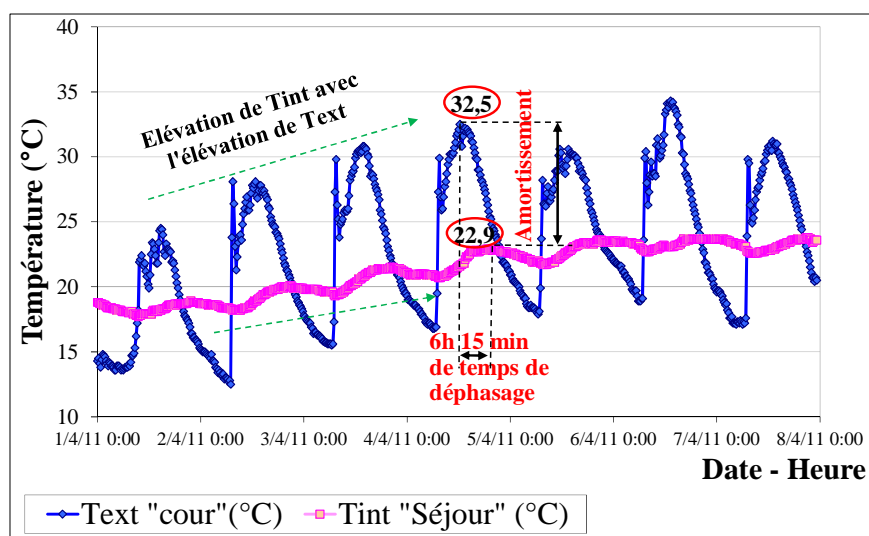


Figure II-31 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de séjour, période mi-saison « maison en terre et paille »

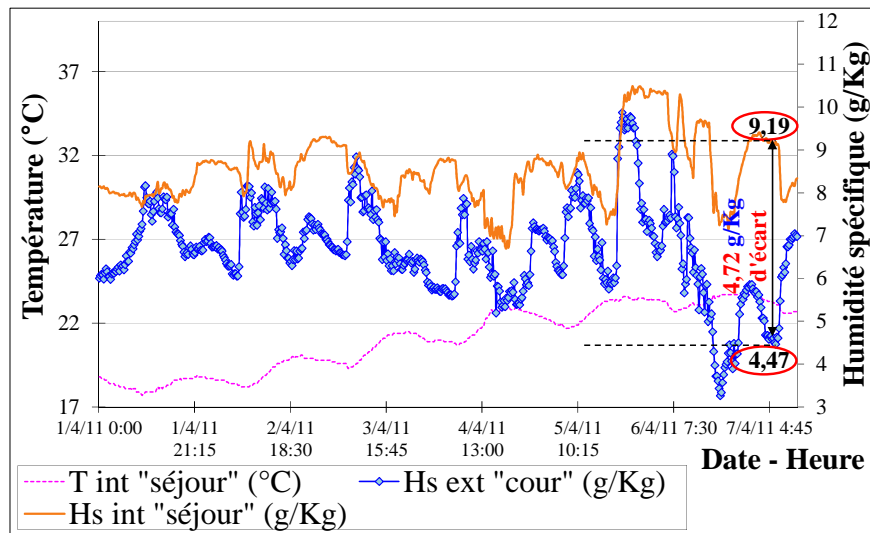


Figure II-32 : Variation horaire de la température intérieure et l'humidité spécifique intérieure et extérieure : cas de séjour, période mi-saison « maison en terre et paille »

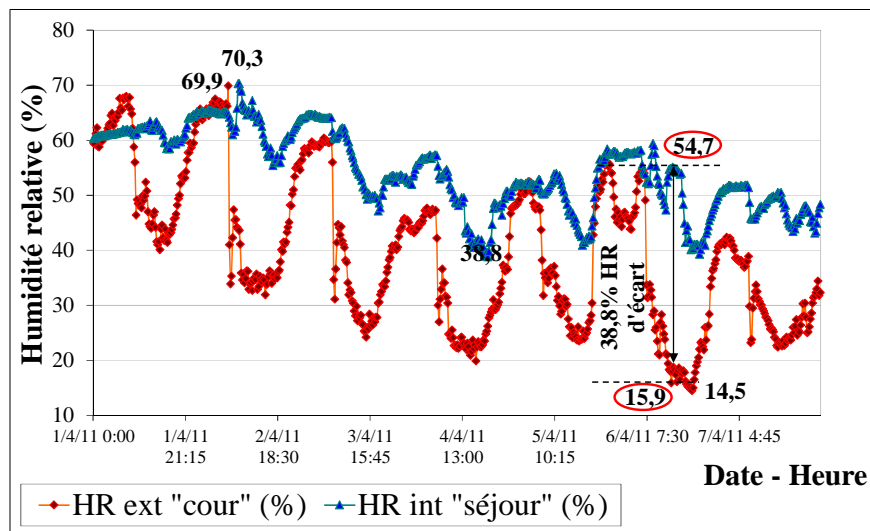


Figure II-33 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de séjour, période mi-saison « maison en terre et paille »

En plus de l'inertie hydrique journalière de l'enveloppe avec l'adsorption et l'amortissement de l'humidité, une inertie hydrique séquentielle peut être aussi distinguée sur le cycle annuel. La capacité d'amortissement présente des effets sur la base annuelle en termes d'une hystérésis entre l'automne et le printemps. Une inertie séquentielle de cinq mois et 10 jours (cumulative de trois séquences) a été enregistrée entre l'automne et le printemps. Remarquablement, cette hystérésis est observée avec des excès plus élevés pour des températures similaires en automne qu'en printemps (Figure II-34). Selon Hence, (2005), l'hystérésis est une conséquence directe de l'inertie hydrique à long terme dans la profondeur des murs, le toit et le plancher.

En revanche, Evrard (2008) affirme qu'il n'y a pas d'accumulation à long terme, car la teneur en eau répète chaque année exactement la même évolution. En utilisant le modèle implémenté dans WUFI ®, l'inertie hygrothermique spécifique du mur en béton de chanvre s'est avérée avoir une influence importante sur le stockage et le transfert à court terme, mais pas sur une longue évaluation à long terme de la demande de chauffage.

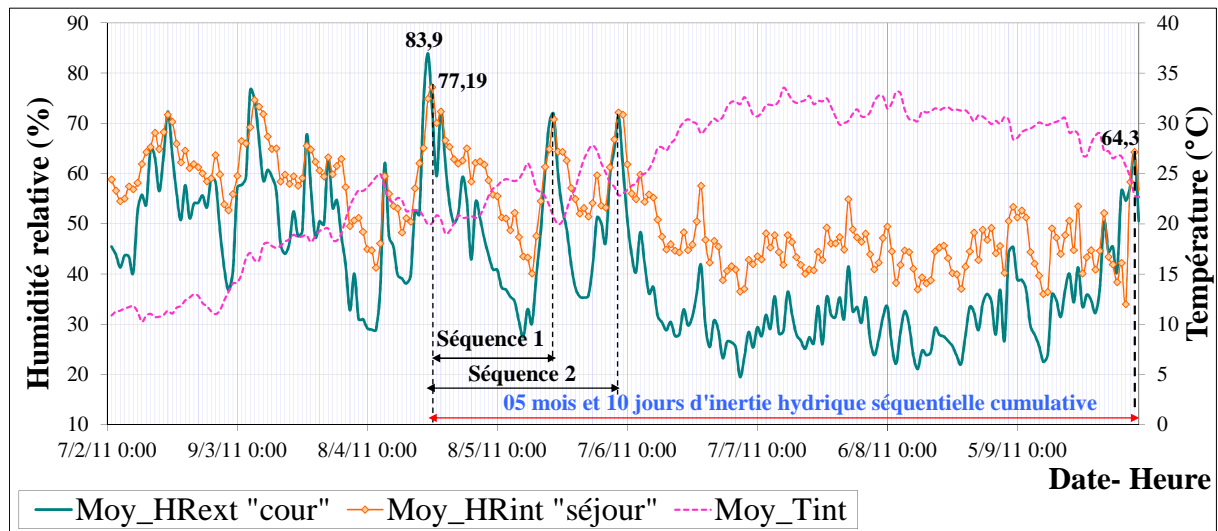


Figure II-34 : Variation des moyennes journalières de la température intérieure et des humidités intérieure et extérieure cas de séjour : saison hiver-automne, maison terre/paille

3-3-2-5. Synthèse et comparatif des résultats séjour/chambre

Afin de comparer l'effet d'amortissement d'humidité dans les deux pièces (séjour et chambre), il aurait été important d'étudier les rapports entre l'amortissement d'humidité, le taux de ventilation et le taux de volume de matériaux hygrothermique. Ce dernier est défini comme le rapport de la surface des matériaux hygrothermique au volume de la pièce. Le taux de volume des matériaux hygrothermiques du séjour est égal à 1,08 (109,21/100,67) et celui de la chambre est égal à 0,83 (83,49/100,67). De ce fait, on peut dire que l'effet d'amortissement d'humidité dans le séjour est plus élevé que celui dans la chambre. Or, le taux de ventilation naturelle dans cette maison ne pourrait être mesuré car non contrôlé. Etant donné que l'effet tampon hydrique des matériaux hygroscopiques peut sensiblement être réduit sous l'effet de la ventilation accrue, il est influencé par la distribution d'humidité intérieure. Le tableau II-6 donne une comparaison générale des résultats de monitoring entre le séjour et la chambre pendant l'hiver, l'été et en mi-saison.

Tableau II-6 : Comparaison des résultats de monitoring entre le séjour et la chambre

| | | Amortissement (K) | | Déphasage (h-min) | | Ecart /T (K) | Ecart/HR (%) | | | Ecart/Hs (g/Kg) | | |
|---------------------------|------------|----------------------|---------------|----------------------------|---------------|-----------------|----------------------------|---------------|--------|-----------------|---------------|-------|
| | | Eté | Mi- saison | Eté | Mi- saison | Hiver | Eté | Mi- saison | Hiver | Eté | Mi- saison | Hiver |
| Séjour | | 10,6 | 9,6 | 4-45 | 6-15 | 11,3 | 44,5 | 38,8 | 26,3 | 9,35 | 4,72 | 4,33 |
| Chambre | | 10 | 8,3 | 5-45 | 5-45 | 16,7 | 28,8 | 46 | 36,1 | 4,5 | 9,73 | 5,79 |
| (%) Amor | Sej | 77,2 | 70,5 | Surf (m²) | Sej | 31,46 | Volu (m³) | Sej | 100,67 | VMH | Sej | 1,08 |
| | Ch | 78,4 | 74,5 | | Ch | 22,2 | | Ch | 71,04 | | Ch | 0,83 |

4. Maison en pierre « Travertin » à Guelma (Algérie)

4-1. Climat de l'aire d'étude

Le climat de Guelma est chaud subhumide en été et froid pluvieux en hiver. Préalablement, l'enveloppe hygroscopique est indirectement recommandée (voir détail en annexe A-1).

4-2. Présentation de la maison

La deuxième maison choisie pour l'étude s'insère dans un centre colonial dense, datant de 1890, Figure II-35. Il s'agit d'un R+1, construit en pierre sur une cave semi enterrée et ouvert sur une cour par la façade nord-est et sur la rue par la façade sud-ouest, Figure II-36.

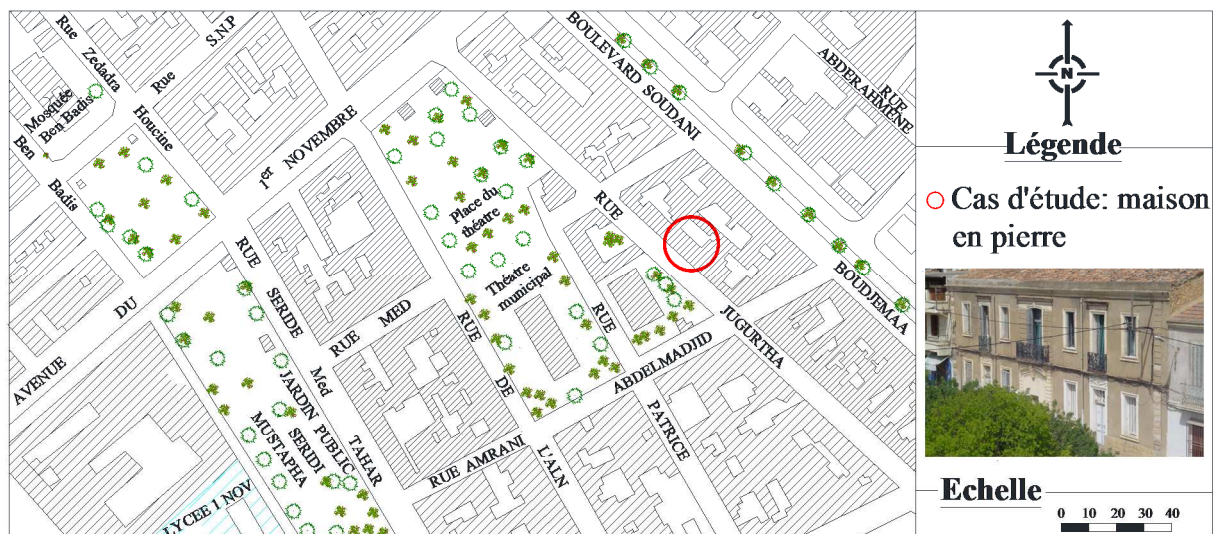


Figure II-35 : Situation de la maison en pierre



Figure II-36 : Vues sur la maison (côtés rue et cour)

4-2-1. Orientation

A part l'orientation de la maison, il n'y a aucun masque environnemental existant sur le site qui puisse occulter la façade sud-ouest. Les constructions sont en bandes de part et d'autre de la voie. De plus, les immeubles en vis-à-vis permettent, avec la voie, chaussée et trottoirs, une distance assez longue dépassant les 20 m, Figure II-37.

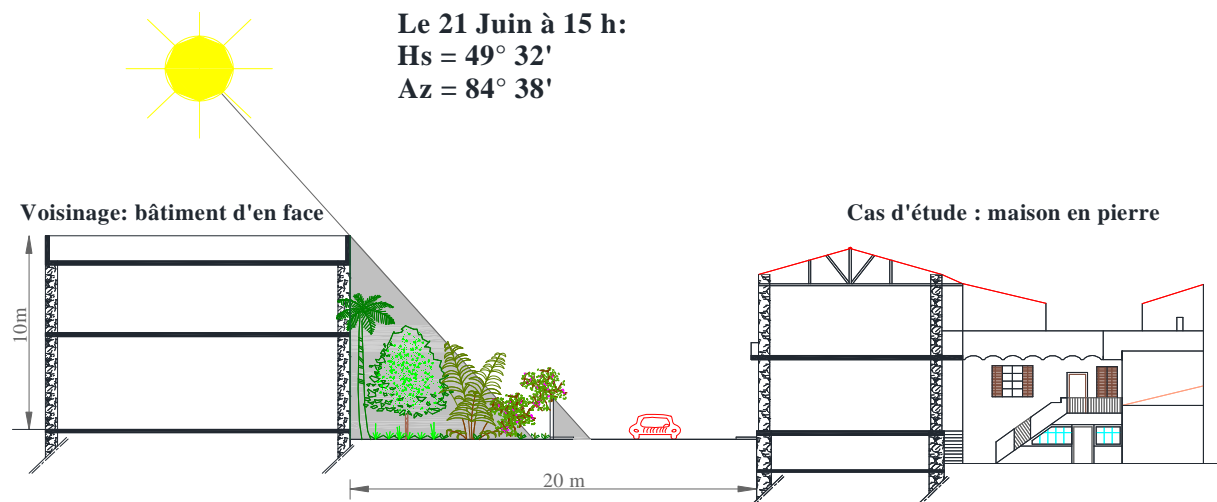


Figure II-37 : Trajectoire solaire et prospect rue (maison en pierre)

4-2-2. Enveloppe et matériaux

L'enveloppe de la maison est constituée d'une grande quantité de matériaux hygroscopiques. Le système constructif est en murs porteurs en moellons de pierre de « travertin » (Figure II-38-a), pierre calcaire caractérisée par de petites cavités inégalement réparties, Figure II-38-f. D'un poids propre de 2500 Kg/m³, les murs sont d'une épaisseur de 56 cm et dépassant 65cm pour les murs de caves. Ils sont constitués d'assises de pierres hourdées au mortier de chaux (matériau hygroscopique) et formés par deux rangées de moellons séparés par un vide, montées lit par lit. Quelques pierres longues sont posées en boutisse pour assurer la liaison entre les deux murs élémentaires accolés.

En plus des moellons de pierre, divers gabarits de briques sont utilisés suivant l'usage ; soit de petites pièces pour les parements (jambage, arc sous voûtes, cloisonnement et dans la chaîne verticale marquant l'extrémité de l'immeuble) ; soit de grands carreaux pour les assises horizontales du mur même, Figure II-38-b. Quant à l'ossature primaire du plancher du R-D-C, elle est constituée d'arcs en briques pleines en forme de voute (matériau hygroscopique) sur caves tracés dans le sens de la largeur des espaces couverts. Ce type de plancher est d'un poids propre considérable, Figure II-38-c. Les planchers d'étage sont aussi d'un poids propre relativement important, Figure II-38-d. Ils se composent d'une traverse qui constitue l'élément porteur. Celle-ci est formée de lambourdes en bois scellées (matériau hygroscopique) contre les murs porteurs et de solivage de poutrelles encastrées (I) en fer forgé, emprisonnant les voûtains de briques. Sur cette structure est posé le parquet en carrelage et mortier de ciment formant ainsi une épaisseur de 25 cm. La toiture est à deux versants couverts de tuiles canal, Figure II-38-e. Un vide de plus de 1,70 cm est laissé entre le plafond et la panne faîtière.

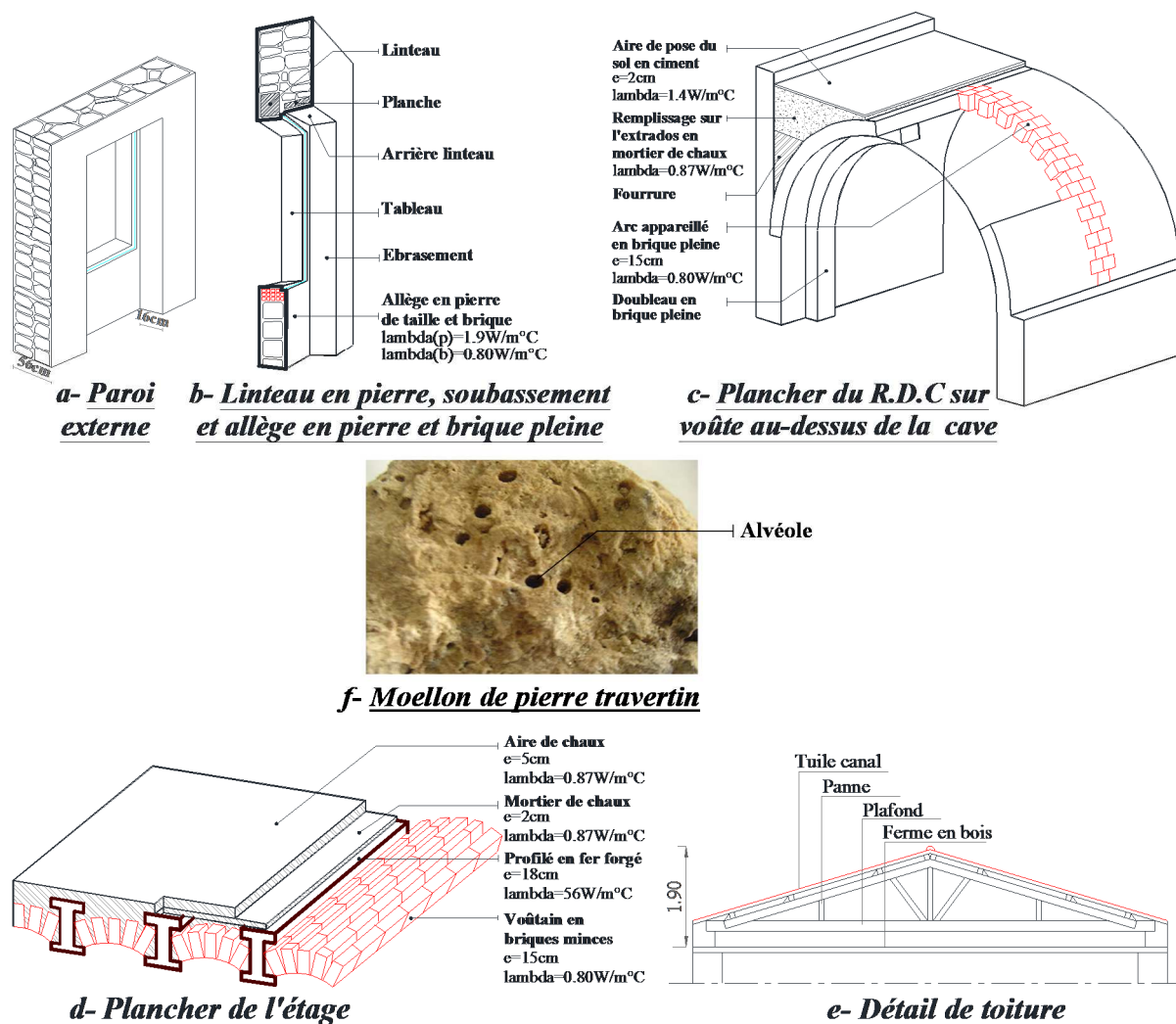


Figure II-38 : Détail de l'enveloppe de la maison en pierre

4-3. Monitoring et interprétation

4-3-1. Appareils et points de mesure

Une série de monitoring, sur une durée de 3 ans (de Juillet 2010 à avril 2013), a été menée. Des relevés de température et d'humidité relative ont été effectués toutes les 15 minutes dans trois pièces du R.D.C, à savoir, le séjour, la chambre 1 (S-O), la chambre 2 (N-E), avec l'utilisation de trois capteurs « LogTag », Figure II-39. Un quatrième capteur, placé sous abri au niveau de la façade N-E, a permis de relever le climat extérieur.

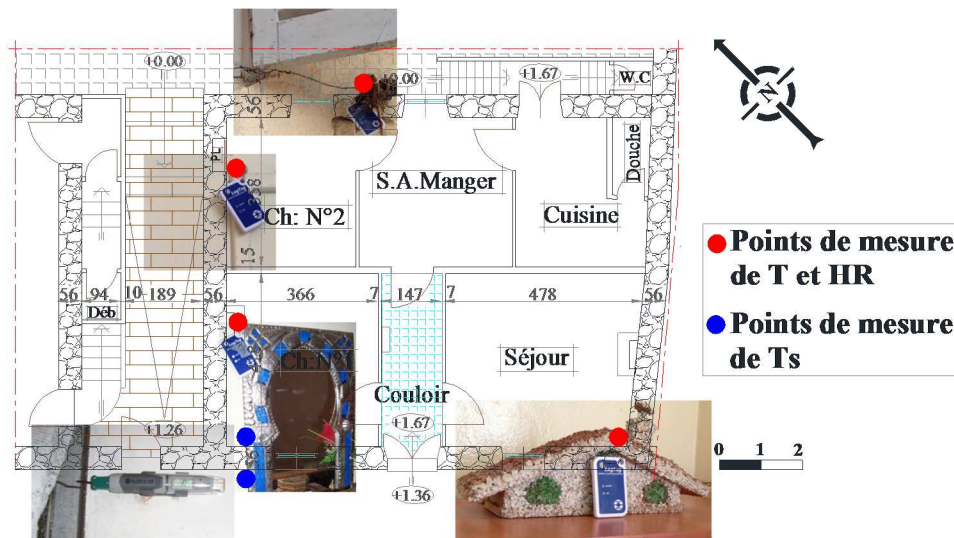


Figure II-39 : Plan de Rez-De-Chaussée et points de mesure (Maison en pierre)

4-3-2. Résultats de mesure

4-3-2-1. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période été

En été, les apports internes, les apports solaires et la température extérieure contribuent à accroître la température intérieure. Dans la maison en pierre, l'inertie thermique de l'enveloppe a très bien permis d'écarter les pointes en gardant la température intérieure très stable, en stockant les surchauffes ponctuelles et en les étalant dans le temps. Au cas de la chambre SO, les apports ont été amortis de 14,6K et 10,2K après 6h30 min de temps de déphasage (T_{int} comparée à la température enregistrée par les services météorologiques et à celle prise au niveau de la cour), Figure II-40. Même si les maisons traditionnelles offrent les meilleures conditions de confort d'été sans apport énergétique [Martin et al, 2010], il est couramment admis que celles en murs épais de pierre jouent sur le déphasage que sur l'amortissement puisque la pierre n'est pas un très bon isolant. Dans ce cas, le phénomène d'amortissement est surtout dû aux multiples alvéoles du travertin et à ses qualités qui favorisent le pouvoir isolant de l'air, en retardant les

mouvements de convection dans les cavités. Le déphasage, quant à lui, est dû à l'inertie par absorption qui se produit avec l'effusivité et l'épaisseur du mur de 56 cm [Medjelekh et al, 2012, 2013]. D'autre part, on peut bien distinguer l'effet du microclimat sur la température externe. Les températures maximales enregistrées par la station météo dépassent celles prises dans la cour et les minimales enregistrées au niveau de la cour dépassent celles de la station, malgré que celle-ci ne soit distante que de 5 km de la maison. La cour tend à baisser les maximales mais à élever les minimales sous l'effet de la température radiante des parois.

Le séjour offre une atténuation de l'onde thermique inférieure à celle de la chambre, mais ce, après un temps de déphasage plus long (amplitudes notées après 9 h de 13,2 et 8,8 K), Figure II-41. Le niveau du confort hygrothermique de la maison est analysé en annexe II-1.

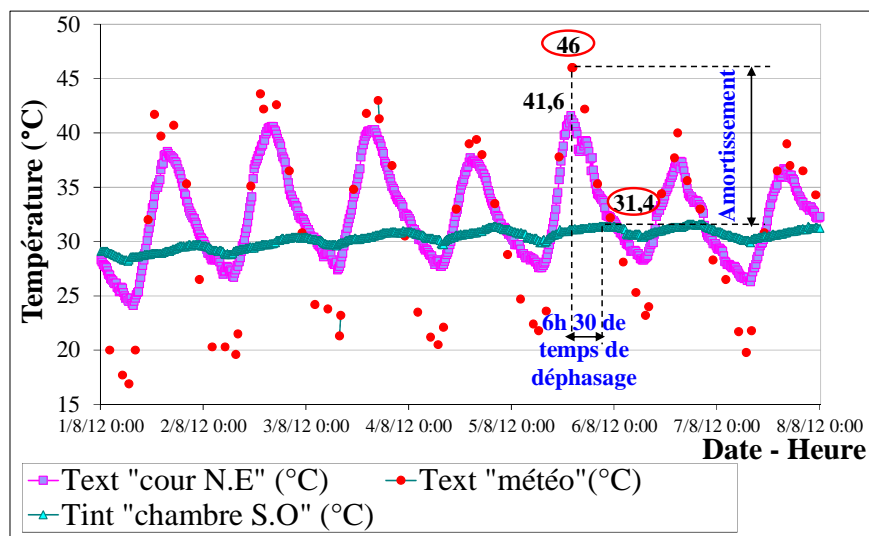


Figure II-40 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure, cas de la chambre S.O, semaine de canicule « maison en pierre»

Or la nuit, il se produit un gain à l'intérieur après la dissipation de la chaleur stockée. Une inertie par transmission se produit et qui augmente, au fur et à mesure, avec l'épaisseur et diminue avec la diffusivité du mur externe. L'inertie thermique écrase donc les températures max le jour et relève légèrement les températures min la nuit, Figure II-42. Ce résultat corrobore celui de Cheng et Givoni, (2005), Medjelekh et al (2010, 2012). La forte inertie doit donc être associée à une surventilation nocturne pour évacuer la chaleur dissipée à l'intérieur. Kendrick et al, (2012) précisent que la masse thermique peut réduire la surchauffe, surtout pendant la journée. Elle doit cependant être maîtrisée par une bonne conception (bonne ventilation nocturne, matériaux corrects dans les endroits corrects). Yao et al, (2009) rajoutent que la stratégie de ventilation naturelle doit tenir compte des conditions climatiques, des caractéristiques thermiques du bâtiment, du type et du profil de ventilation et des gains internes.

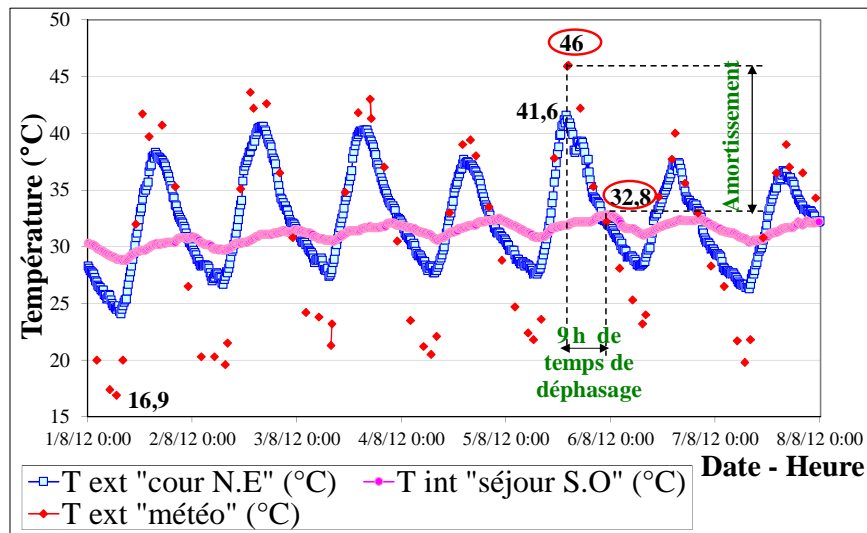


Figure II-41 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure, cas de séjour S.O, semaine de canicule « maison en pierre »

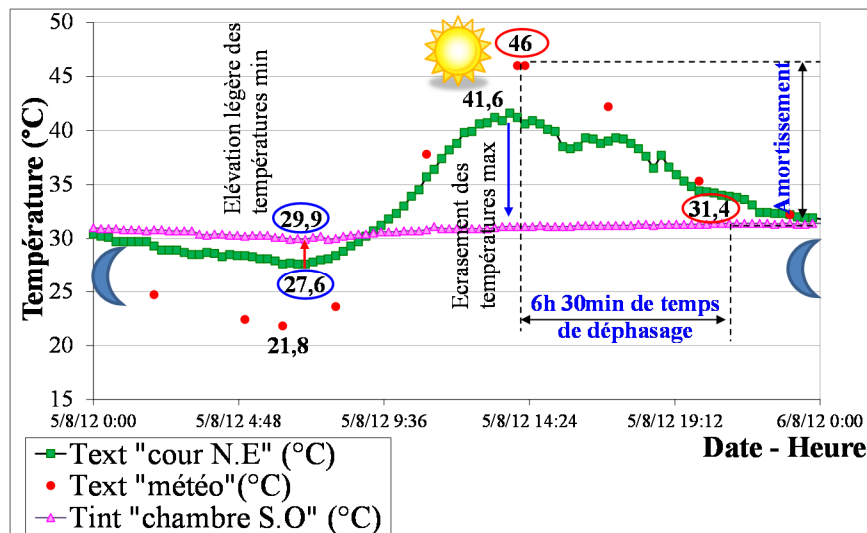


Figure II-42 : Variation horaire journalière de la température extérieure et intérieure dans la chambre S.O : période d'été, journée de canicule (maison en pierre)

Par ailleurs, l'orientation sud-ouest de la paroi externe, sa couleur sombre et l'absence totale d'occultation provoquent la hausse de la température de surface externe. Elle atteint 49,5 °C (en journée nuageuse Figure II-43) comparée à la température de surface interne de la paroi qui ne dépasse pas 32 °C. Celle-ci est essentiellement liée à la qualité thermique du travertin qui évite l'effet de la paroi chaude en été. Le travertin peut être considéré comme matériau « cool ». Ce constat est en accord avec celui d'Araujo Prado. R, Ferreira (2005) sur les céramiques. Signalant que 49,5 °C de température de surface est bien loin de la température surfacique réelle de la paroi.

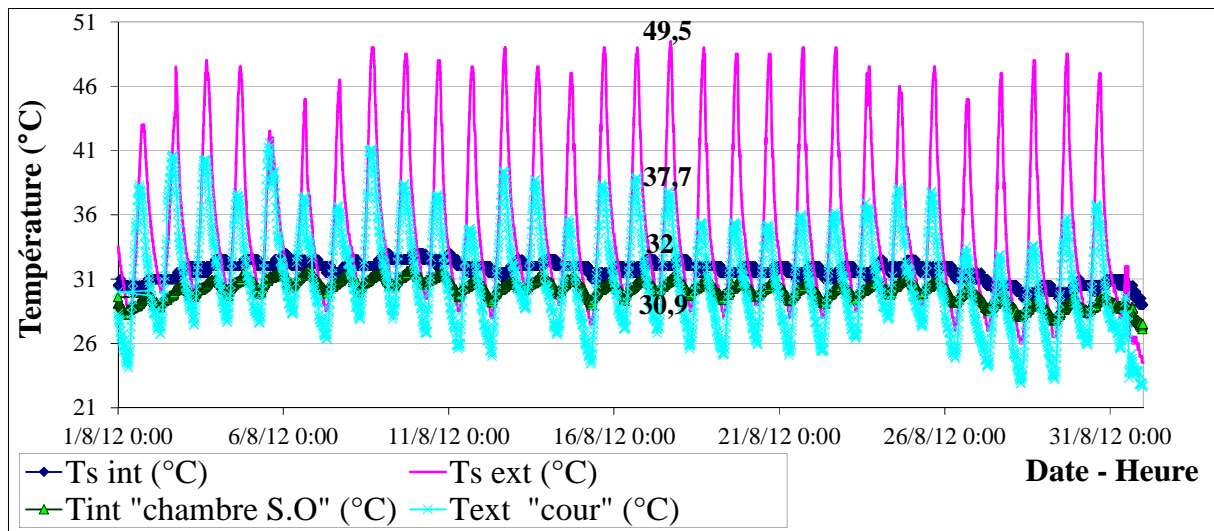


Figure II-43 : Variation horaire des températures intérieure, extérieure ambiante et surfacique, cas de la chambre S.O, mois d'août 2012 « maison en pierre »

Concernant le comportement hydrique, l'humidité relative au niveau de la chambre est inférieure à celle enregistrée par les services météorologiques. L'écart max noté de 39,4 % (Figure II-44) est attribué à l'effet du microclimat environnant la station météorologique. Mais l'humidité relative ambiante est supérieure le jour comme la nuit à celle enregistrée au niveau de la cour avec un écart max de 38 %.

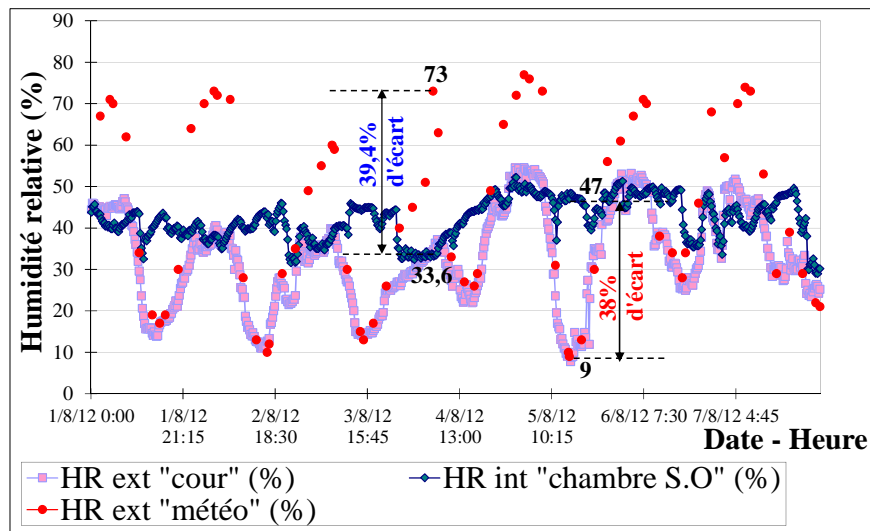


Figure II-44 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de la chambre S.O, semaine de canicule « maison en pierre »

Comme pour la température intérieure, l'humidité relative ambiante présente une stabilité comparée à celles de l'extérieur (cour et météo). Elle dépasse l'humidité au niveau de la cour d'un écart maximal de 40,7 %, Figure II-45. Les valeurs de l'humidité relative intérieure montrent ces effets probablement parce qu'elles sont évaluées aux températures respectives et expliquent indirectement l'effet de la pression de vapeur d'eau sur l'évaporation. L'effet de l'inertie hydrique de la pierre intervient aussi dans le maintien de l'équilibre hygrométrique en limitant les variations de l'humidité. En plus de ses propriétés thermiques, la pierre avec ses propriétés diffusives permet de réguler les conditions internes. Ces échanges hydriques avec l'air permettent au travertin, de se mettre en équilibre.

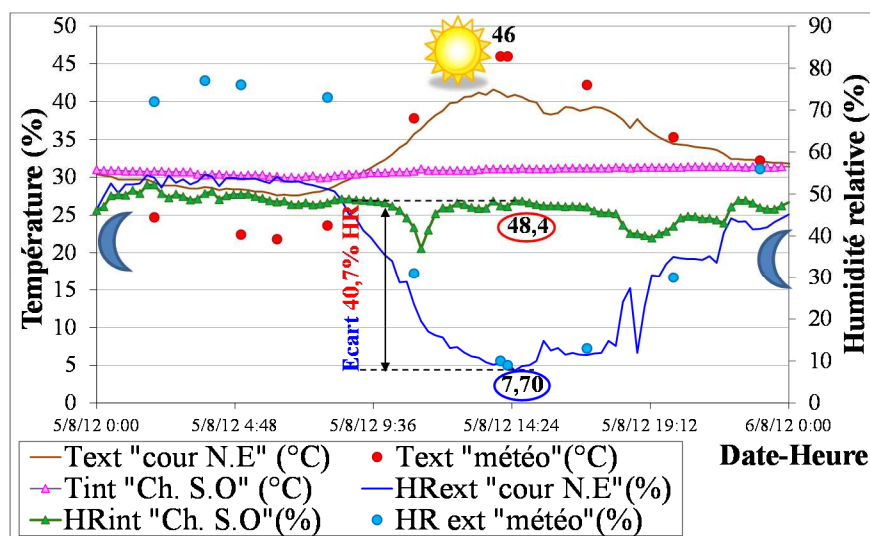


Figure II-45 : Variation de l'humidité relative intérieure et extérieure, et la température intérieure et extérieure dans la chambre S.O : journée de canicule « maison en pierre »

La variation de l'humidité spécifique interne suit celle de l'extérieur (cour), mais parfois avec des valeurs nettement supérieures, malgré que le climat soit subhumide. Un écart maximal de 10,04 g/kg a été enregistré à 14h 30 entre les deux humidités, où la température et l'humidité spécifique extérieures sont maximales et la température ambiante est stable, Figure II-46. Des pics d'humidité spécifique interne sont enregistrés la matinée entre 9h30-11h, l'après-midi entre 16h-19h et le soir entre 20h-22h à cause des tâches ménagères et la production métabolique des occupants. Ces pics sont cependant la cause d'un abaissement des températures ambiantes. L'humidité dans les bâtiments affecte les charges de conduction sensibles et latentes [Mendes et al, 2003].

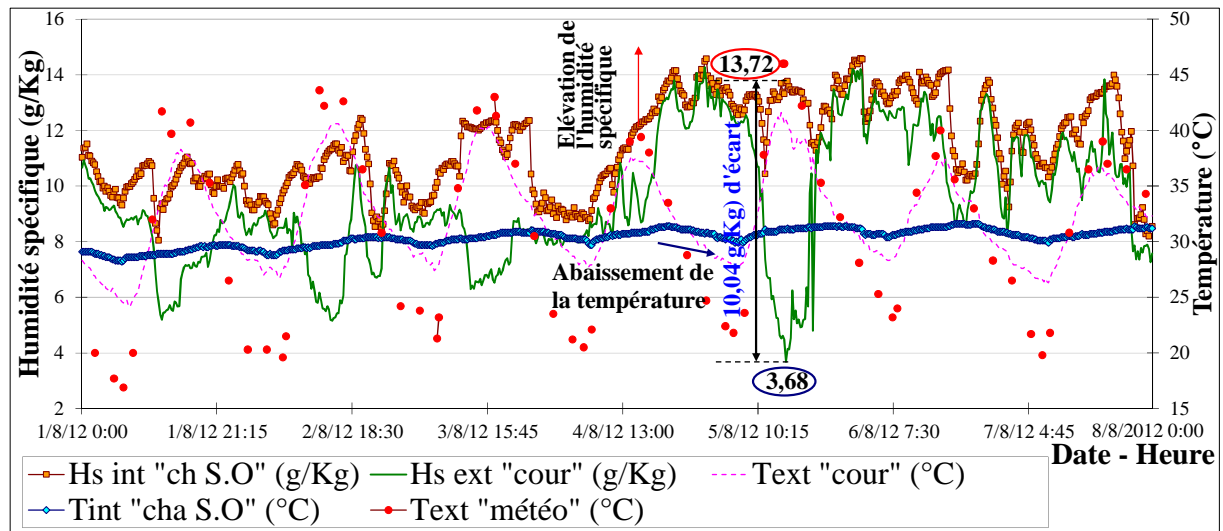


Figure II-46 : Variation horaire de l'humidité spécifique extérieure, intérieure et de la température extérieure, intérieure, cas de la chambre S.O : semaine type, période estivale

* Effet du parement hygroscopique

Une suppression de la peinture en laque et l'application d'un enduit de plâtre et mortier de chaux au niveau de la chambre S.O a été procédée pour vérifier l'effet du parement perméable sur l'ambiance. La comparaison, entre la chambre S.O et le séjour S.O peint en laque, montre bien qu'il s'agit des mêmes scénarios d'orientation, d'ouverture de fenêtres, d'inertie thermique et d'occupation mais l'humidité spécifique dans la chambre dépasse d'un écart max de 2,69 g/Kg celle du séjour. La température de la chambre est aussi inférieure à celle du séjour, avec un écart max de 1,5 °C, Figure II-47. Ceci peut être attribué à une présence d'eau sur la surface de la paroi de la chambre dont la quantité de vapeur adsorbée était plus importante. L'enduit de plâtre et mortier de chaux ont permis, à part leur hygroscopie, d'absorber et de diffuser l'eau sous forme de chaleur latente contribuant à l'abaissement de la température ambiante de la chambre. La peinture en laque au niveau du séjour constitue, en revanche, une couche additionnelle à la pierre travertin. De ce fait, les revêtements perméables fournissent une meilleure isolation et permettent une inertie thermique efficace améliorée. Leur utilisation peut être considérée comme une méthode de confort adaptatif qui prend en compte les conditions intérieures et extérieures transitoires permettant une optimisation de l'énergie et les conditions de confort [Orosa et Oliveira, 2012]. En outre, les vieux bâtiments ont montré une réduction distincte de l'humidité intérieure sous l'effet tampon des revêtements perméables. Ils maintiennent même leurs propriétés de régulation, et ce, pendant une étude à long terme [Hameury, Lundström, 2004], [Simonson et al, 2002].

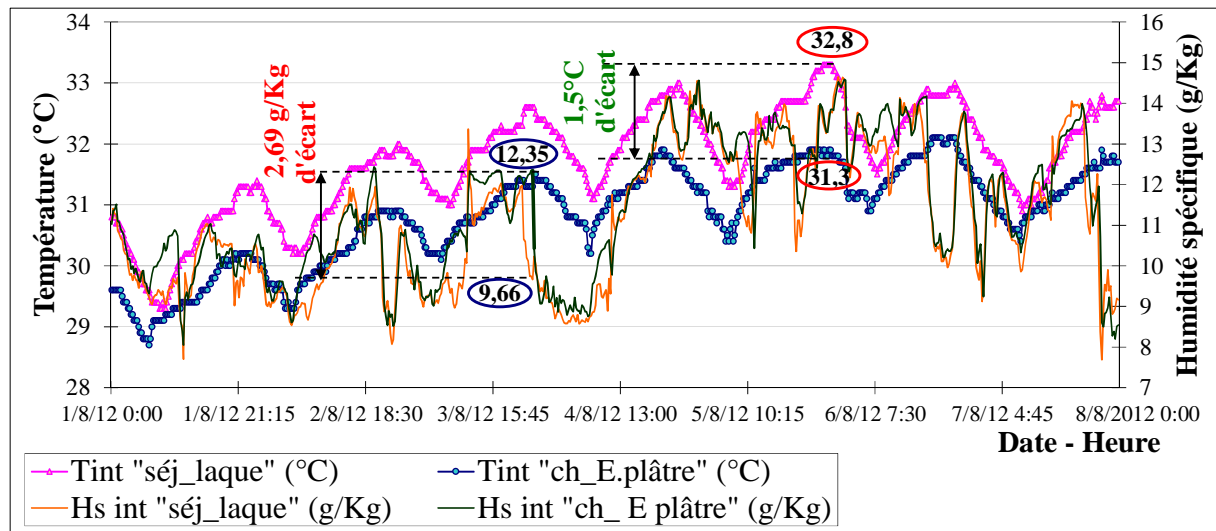


Figure II-47 : Variation horaire de l'humidité spécifique intérieure et de la température intérieure : cas du séjour et de la chambre S.O, semaine type, période estivale

Nous pouvons retenir que la grande quantité des matériaux hygroscopiques, constituant l'enveloppe de la maison en pierre, n'est pas la seule à l'origine de la stabilité thermo hydrique de l'ambiance. Il y a d'autres paramètres aussi importants. En effet, la cave participe au rafraîchissement du RDC. La hauteur sous plafond permet de larges surfaces effusives. Le comble protège l'étage des radiations solaires directes. Par ailleurs, le montage des pierres, lit par lit au niveau de la paroi, laisse un vide sur toute sa hauteur, et l'utilisation de moellons de grosseur et de forme différente laisse des interstices sur toute sa largeur, permettant la respiration de l'enveloppe. Aussi, la compacité du tissu urbain garantis une inertie par transmission. La ventilation en revanche a le plus d'effet dans l'ambiance, soit dans l'humidification ou la déshumidification, l'abaissement ou l'élévation de la température, selon les conditions externes. Les meubles et les tapis absorbent et rejettent la vapeur d'eau.

Les résultats de mesure en hiver et mi-saison dans la maison sont discutés en annexe A-1.

5. Maison à enveloppe préfabriquée en plaques de plâtre à Séraïdi (Algérie)

5-1. Climat de l'aire d'étude

Le climat de type montagneux de Séraïdi est froid pluvieux en hiver, doux et humide en été. D'après l'analyse bioclimatique, l'enveloppe hygroscopique est aussi obliquement conseillée pour cette région (voir annexe A-1). Celle-ci va absorber le surplus de l'humidité de l'air. Selon Rode et al, (2005) dans toutes les zones climatiques, il est possible d'améliorer les conditions de l'humidité intérieure en mettant en œuvre des matériaux hygroscopiques.

5-2. Présentation de la maison

La maison de Séraïdi s'insère dans un contexte urbain peu dense. C'est une maison d'un seul niveau, isolée dans sa parcelle. Elle est ouverte par deux façades sur le jardin, une coté sud-est (d'entrée, côté rue), et l'autre nord-ouest (arrière), Figure II-48.



Figure II-48 : Situation de la maison en plaques de plâtre

5-2-1. Enveloppe et matériaux

De système préfabriqué, l'enveloppe est construite en panneaux de plaques de plâtre assujettis à une structure métallique en profilés d'acier galvanisé (assemblés par vis auto-forieuses ou boulons). L'habillage intérieur est assuré par une deuxième couche en plaques de plâtre. La mousse polyuréthane, du côté externe, présente l'âme du panneau avec un parement sur les deux façades d'entrée et un revêtement en crépissage sur les façades latérales, Figure II-49. L'épaisseur des parois est faible, 10 cm pour les parois externes, 7,50 cm pour les cloisons intérieures. Au-dessus du plafond, la toiture est à deux versants et couverte en tuile plate.

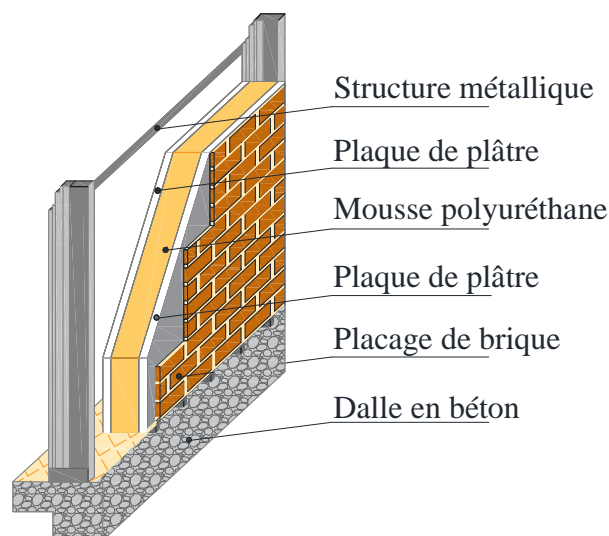


Figure II-49 : Détail de la paroi extérieure (maison en plaques de plâtre)

5-3. Monitoring et interprétation

5-3-1. Appareils et points de mesure

Comme pour la maison en terre, 15 mois de monitoring ont été menés sur la maison en plaques de plâtre. Les prélèvements de température et d'humidité relative au moyen des capteurs « LogTag », avec 15 minutes de pas de temps, ont été soulevés dans le séjour (double orientation S.E, N.O) et la chambre 2 (orientation N.O). Les enregistrements des conditions externes ont été pris sous abri, au niveau de la façade S.E, Figure II-50.

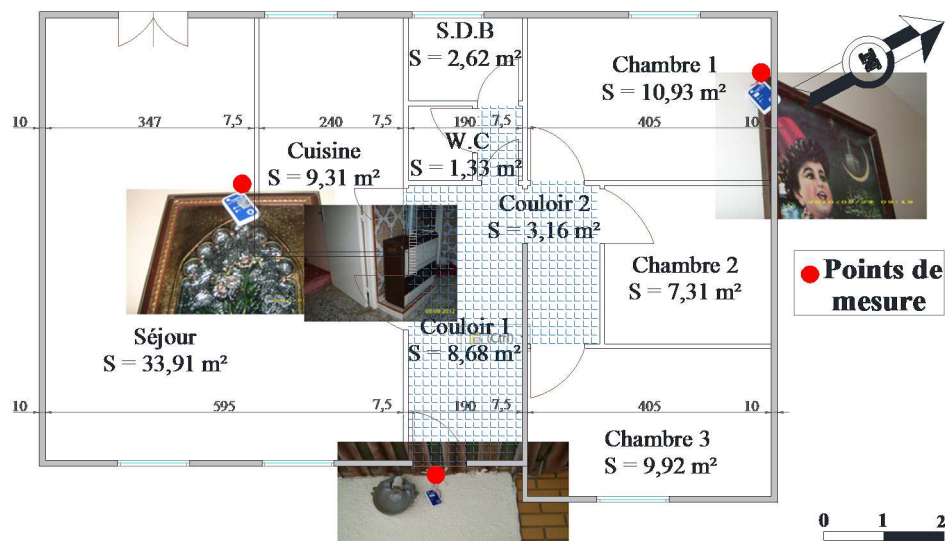


Figure II-50 : Plan de maison et points de mesure

5-3-2. Résultats de mesure

5-3-2-2. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période été

La température dans le séjour N.O/S.E, comparée à celle de l'extérieur, est inférieure et plus stable avec une amplitude moyenne max de 4,77 °C. Elle chute en fin de journée et suit la température externe par le profit de la ventilation. Bien qu'il s'agit d'une faible inertie thermique de l'enveloppe, un amortissement de 7,3 °C a été enregistré après 3h 15 min, Figure II-51. L'effet isolant de l'enveloppe est assuré par la toiture en pente d'une part, et par la qualité thermique des matériaux des murs d'autre part.

Un amortissement de 8,6°C a été noté dans la chambre N.O après 5h de temps, Figure II-52. Les apports ont été mieux amortis et déphasés que dans le cas de séjour, puisque le volume de la chambre est deux fois inférieur à celui du séjour. De plus, l'ouverture du séjour sur

l'orientation S.E, en plus du N.O, cause l'élévation de sa température ambiante (température mesurée à 34,1°C).

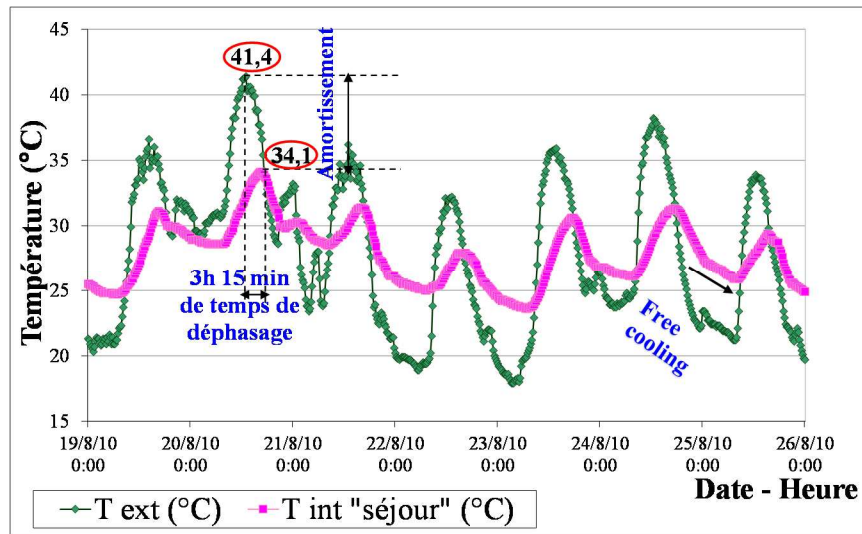


Figure II-51 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure, cas de séjour N.O/S.E, semaine de canicule « maison en plaques de plâtre »

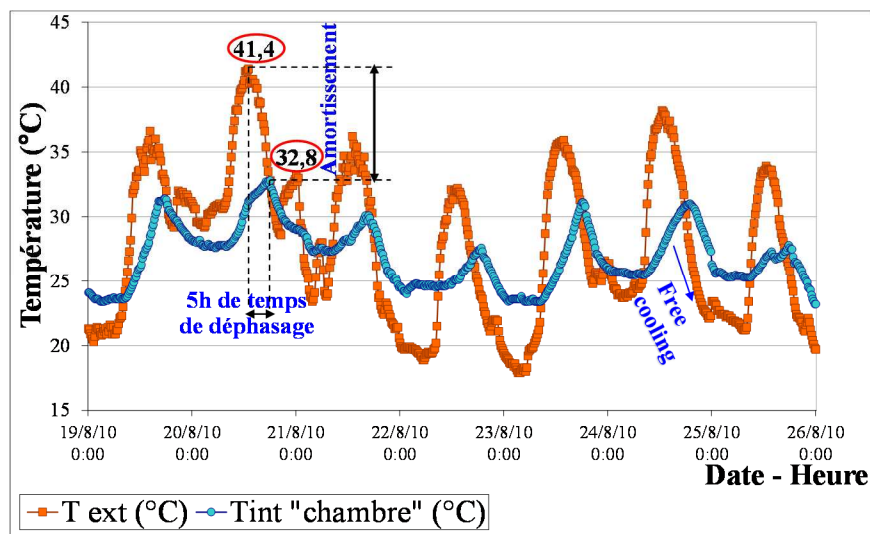


Figure II-52 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure, cas de la chambre N.O, semaine de canicule « maison en plaques de plâtre »

A cause des charges hydriques internes, et même que le climat soit humide, l'humidité relative ambiante dans la chambre dépasse celle de l'extérieur d'un écart max de 33,5 %HR. Néanmoins, durant les journées orageuses, le dépassement est inversé pour l'humidité relative externe d'un écart max de 40,1 %HR, Figure II-53. La recherche montre que, pendant l'échauffement dû au rayonnement solaire et sous ce type de climat, certaine quantité de chaleur

est utilisée en tant que chaleur latente d'évaporation de l'humidité adsorbée. Ce phénomène naturel peut être manipulé pour réduire le gain de chaleur par l'enveloppe hygroscopique [Sudhakumar, Madhuraj, 2011]. Or le cas de la maison, la variation de l'humidité spécifique interne suit presque parfaitement celle de l'externe à cause de la ventilation. En journée humide, l'humidité spécifique externe dépasse l'interne d'un écart max de 9,13 g/Kg, Figure II-54. Cette charge hydrique est causée par l'occupation. La diffusion de la vapeur d'eau des matériaux de l'enveloppe ne peut être évoquée à cause de la présence de la mousse polyuréthane dans la paroi, en plus de l'effet de la ventilation nocturne qui domine. La maison donne sur son jardin. Les fenêtres sont bien ouvertes le soir, profitant des températures fraîches du microclimat.

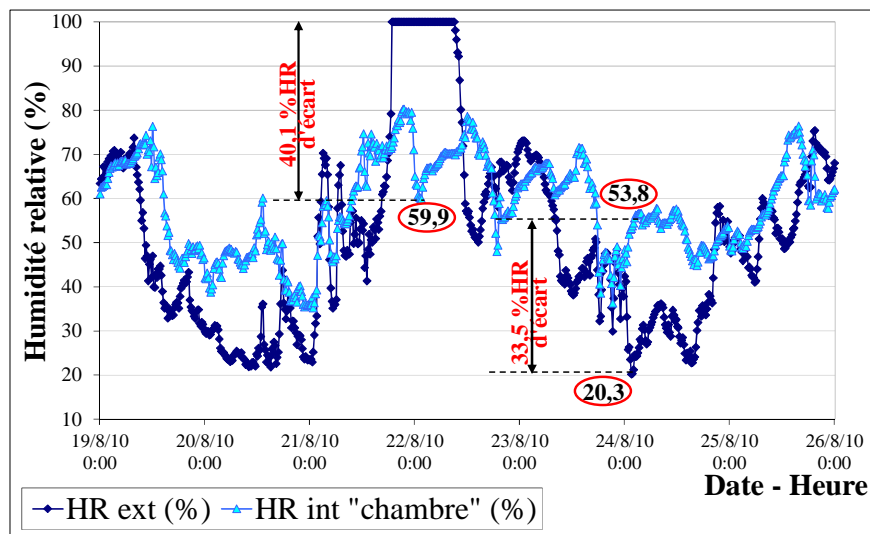


Figure II-53 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de la chambre N.O, semaine de canicule « Maison plaques de plâtre »

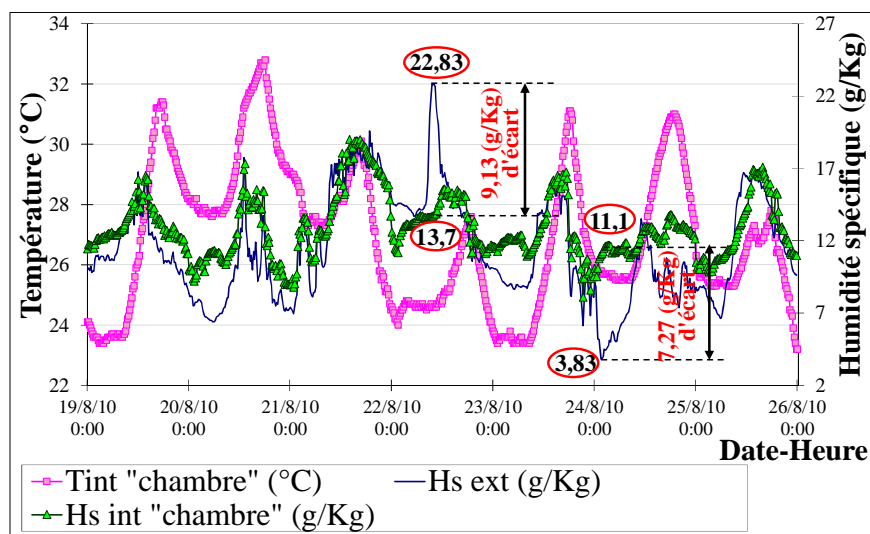


Figure II-54 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure, extérieure et l'humidité spécifique intérieure : cas de la chambre N.O, semaine de canicule « M. plaques de plâtre »

Il peut être conclut que faible ou forte inertie thermique ne rime pas avec forte ou faible inertie hydrique, c'est plutôt lié à la nature de l'enveloppe et son hygroscopicité. Il s'agit d'une faible inertie thermique avec un effet isolant pouvant être généré probablement par une part de l'inertie hydrique, mais le phénomène est invisible, surtout à cause de la ventilation. Voir l'interprétation des résultats du monitoring de la maison en hiver et mi-saison en annexe A-1.

6. Maison à ossature bois à Ussanges (Treignac en France)

6-1. Climat de l'aire d'étude

Le climat d'Ussanges est de type océanique, de transition subhumide, repéré dans la zone climatique H1c à une altitude 564 m (voir annexe A-1).

6-2. Présentation de la maison

Une maison individuelle à ossature bois située à une altitude 550 m à Ussanges, Figure II-55, a été également choisie pour le monitoring. Elle est habitée depuis le 30 juillet 2008. D'une bonne compacité, l'enveloppe est protégée du vent à l'ouest par un couvert végétal et d'arbres. La surface vitrée au nord représente 36% et celle au sud 29% de l'enveloppe. La maison est équipée d'une ventilation mécanique contrôlée VMC HygroB, à simple flux avec bi-pass. Cette dernière est dotée d'une extraction \varnothing 125 mm et \varnothing 80 mm en R-D-C et de deux extractions \varnothing 80 mm à l'étage, avec deux entrées d'air en RDC et deux à l'étage. Le chauffage utilisé est d'appoint par convecteur radiant électrique. La maison est également équipée d'un poêle à bois, d'une programmation de confort de 16 à 19°C et d'un ballon électrique de production d'eau chaude sanitaire.

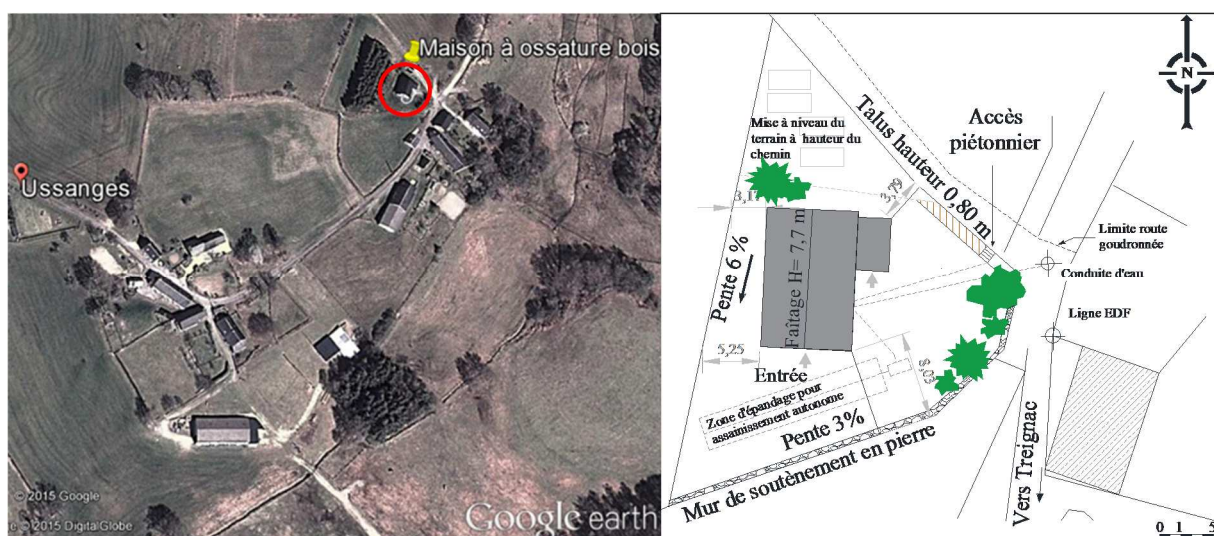


Figure II-55 : Situation et plan de masse de la maison ossature bois

6-2-2. Enveloppe et matériaux

La maison est construite en ossature bois avec une dalle en bois sur murets maçonnés. Elle est de structure plain-pied et combles habitables à 45°, avec un appentis en façade Est. Les murs sont étanchéifiés sur le pourtour via un pare-vapeur/pare-air et sont recouverts par un bardage en bois. Les rampants de toiture sont recouverts d'un écran sous-toiture réfléchissant, une ventilation de 38 mm et une isolation en laine de verre. La couverture est en ardoise.

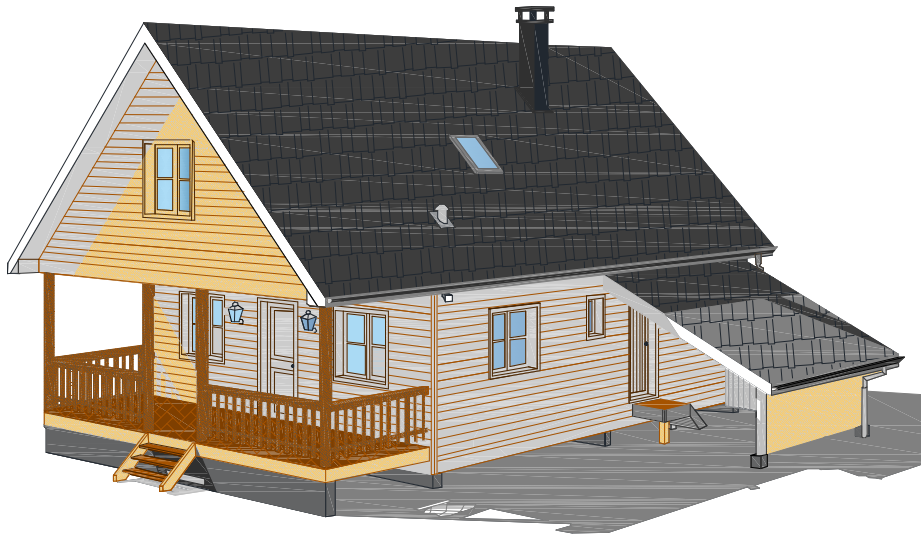


Figure II-56 : Vue perspective sud-est de la maison à ossature bois

6-3. Monitoring et interprétation

6-3-1. Appareils et points de mesure

Six ans de monitoring ont été menés sur la maison. Deux sondes de prélèvement de température et d'humidité relative intérieures ont été placées à 1,50 m du sol. La première en R.D.C au niveau du séjour/salle à manger. Une deuxième sonde est positionnée à l'étage, au niveau de la chambre d'enfant, au sud. Deux autres sondes ont été installées sous abris pour les prélèvements extérieurs de température et d'humidité relative. Une sonde placée au nord sous le balcon et l'autre au sud sous le plafond de la terrasse, Figure II-57.

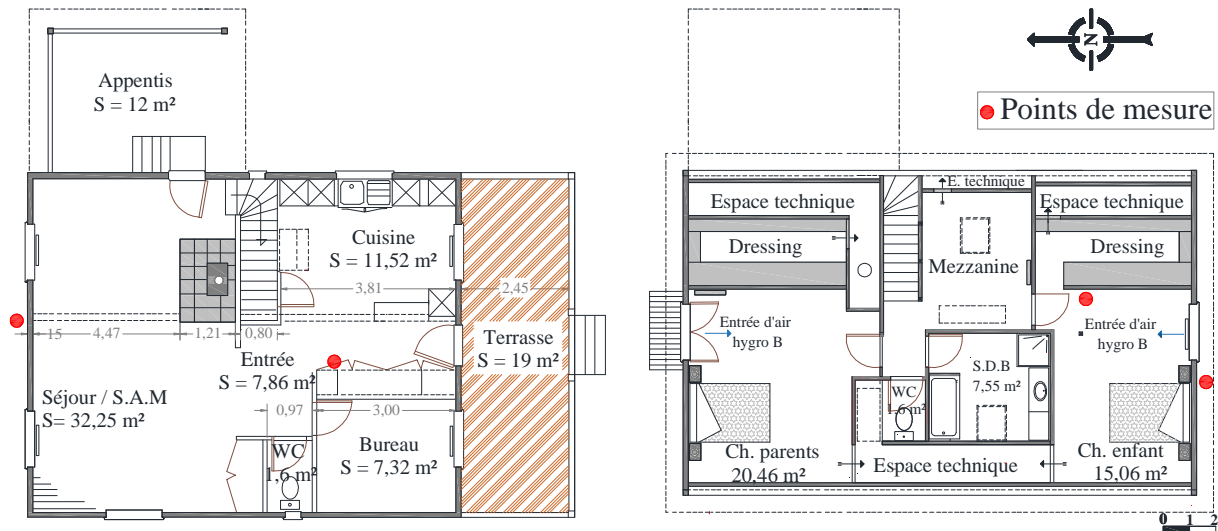


Figure II-57 : Plans R.D.C, étage et points de mesure (séjour/S.A.M : pièce 1 d'investigation, chambre d'enfant : pièce 2 d'investigation)

6-3-2. Résultats de mesure

6-3-2-1. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période été

La température intérieure du séjour offre une stabilité avec une amplitude moyenne max journalière de 2,7 °C. Du fait que la maison soit dotée de la ventilation VMC et malgré qu'il y ait trois fenêtres au niveau du séjour, la pièce ne profite pas au maximum du free-cooling. La température intérieure ne chute pas autant qu'à celle d'extérieur. La réactivité thermique du bâtiment [Fanguin, 2009] se manifeste surtout le matin suite à la ventilation matinale. Une chute instantanée de 2,2 °C a été enregistrée en 1h 45min (voir ellipse noire, Figure II-58). Un amortissement de 5,7 °C a été noté après 7h 15min entre la température extérieure (côté nord) et la température intérieure. Les apports ont été donc moyennement amortis mais bien déphasés dans le temps (faible inertie thermique et bonne isolation thermique de l'ossature bois).

La chambre d'enfant, au sud, offre aussi une bonne réactivité thermique en raison de la faible inertie. Suite au free-cooling la température chute brutalement (ellipses rouge, Figure II-59). La chute instantanée arrive à 2,53°C en 2 h. Ici, la ventilation naturelle s'ajoute à la ventilation mécanique. Un amortissement de 7,1°C a été noté après 3h 15min entre la température extérieure et ambiante. La température de l'air influence très peu la résistance thermique de l'ossature bois, qui se défend bien vis-à-vis des surchauffes extrêmes extérieures (37°C au sud).

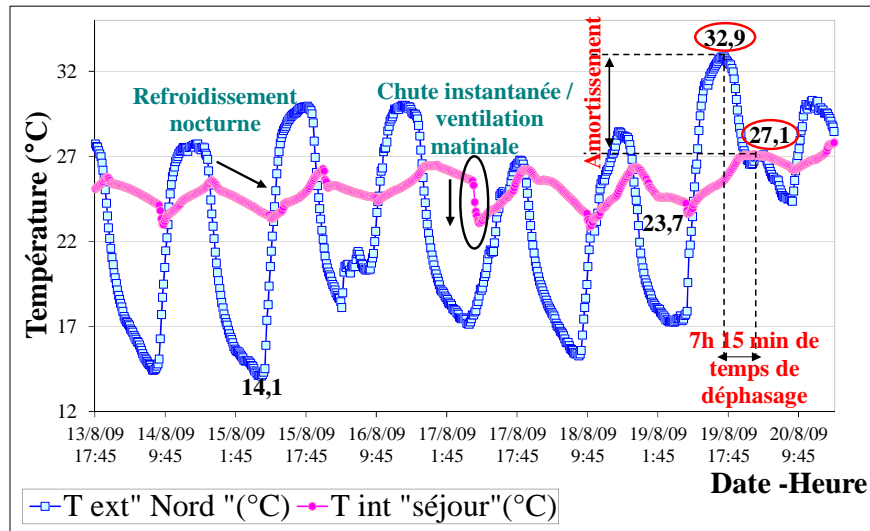


Figure II-58 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de séjour, période estivale « maison à ossature bois »

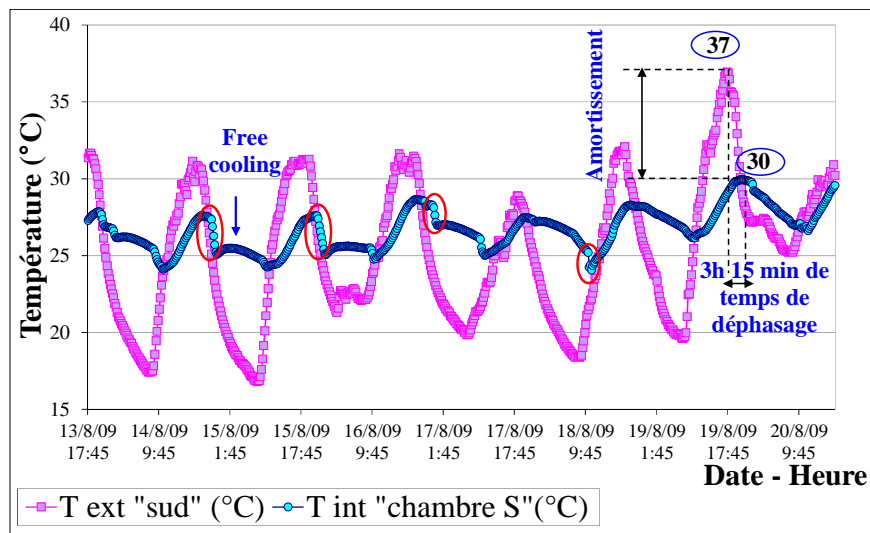


Figure II-59 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de la chambre sud, période estivale « maison à ossature bois »

L'humidité relative externe dépasse d'un écart max de 43,7 % celle de l'intérieur pendant la plupart du temps (climat océanique de transition : orageux l'été), Figure II-60. L'humidité relative ambiante dans le séjour est très stable et sa variation dépend légèrement de celle de l'extérieur. Les échanges hydriques avec l'air intérieur se font uniquement sur les couches du matériau placées coté intérieur par rapport au pare-vapeur/pare-air. Cependant, l'humidité relative interne marque, aux moments de ventilation, des pics entre 9h et 10h et des chutes entre 21h et 23h.

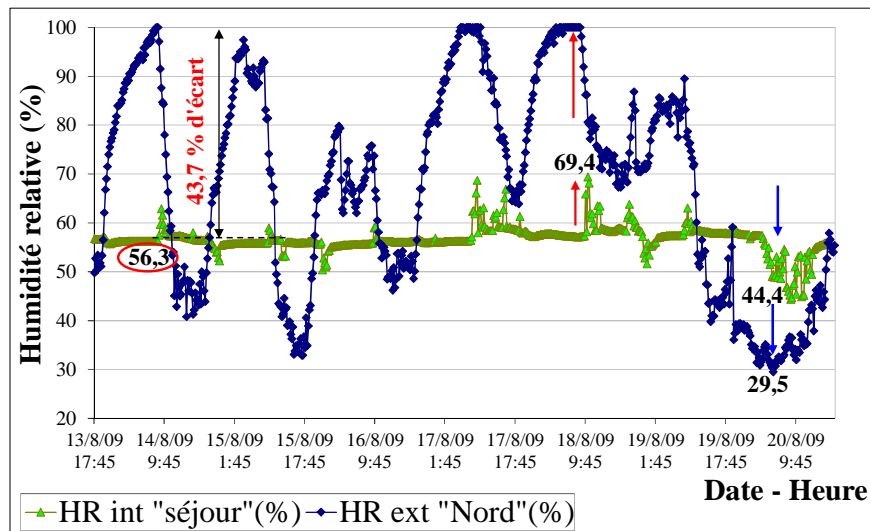


Figure II-60 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de séjour, période estivale « maison à ossature bois »

A cause de l'étanchéité, l'humidité spécifique intérieure ne dépend pas de celle de l'extérieur, excepté aux moments de la ventilation. Elle est inférieure à l'humidité spécifique extérieure pour la plupart du temps avec un écart max de 06,24 g/Kg. Mais elle dépasse celle-ci pour le reste du temps avec un écart max de 5,97 g/Kg enregistré la nuit. Les pics et les chutes dans l'humidité spécifique intérieure ont été enregistrés aux mêmes moments des pics de la température intérieure respectivement entre 21h-23h et 9h-10h (moments de ventilation), suivant les conditions externes, Figure II-61.

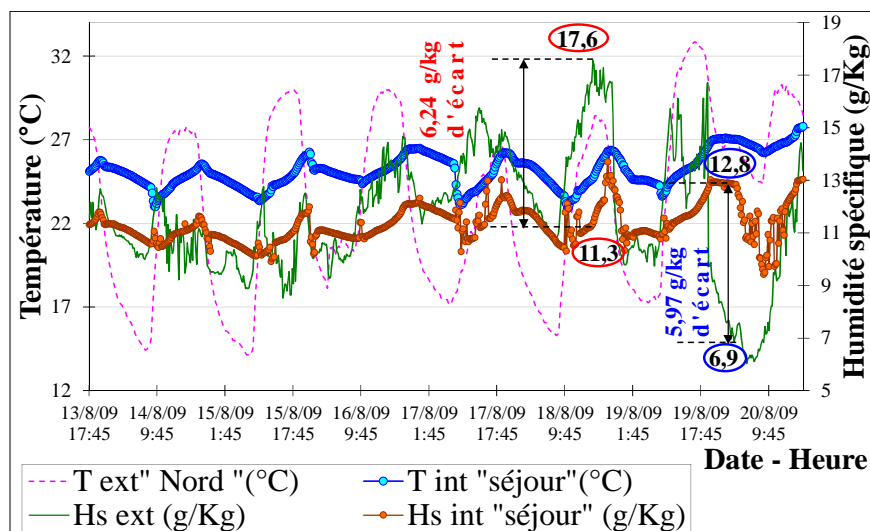


Figure II-61 : Variation horaire de la température et l'humidité spécifique, intérieures et extérieures : cas de séjour, période estivale « maison à ossature bois »

La maison à ossature bois représente un peu l'antithèse des autres maisons étudiées. Il s'agit d'un matériau hygroscopique, le bois, mais la présence de pare-vapeur bloque les transferts hydriques avec l'extérieur (voir résultats du monitoring en hiver et mi-saison en annexe A-1).

7. Evaluation de la consommation énergétique des maisons

Pour l'étude de la consommation énergétique, une évaluation quantitative et équivalente a été avisée aux cas des maisons monitorées en Algérie. Pour les maisons pierre et plaque de plâtre, le taux de chaque type d'énergie a été prélevé de la facture de gaz et d'électricité (d'après les compteurs de la Sonelgaz installés). L'étude de ces deux formes d'énergie utilisées s'est basée sur l'interprétation du taux de consommation et non du coût. En Algérie, les prix du gaz naturel et de l'électricité changent de tarif d'une période à autre. De plus, ils sont en augmentation d'une année à une autre. Dans la maison terre/paille, la consommation énergétique a été déduite de la consommation des bouteilles du gaz butane pour le chauffage d'appoint. Enfin, la consommation de la maison ossature bois qui était mesurée par un compteur (Delta-Dore TYWatt 40) au nombre d'impulsion délivrées, concerne uniquement le chauffage et la production de l'eau sanitaire et exclut le reste des consommations domestiques.

7-1. Etude de la consommation énergétique de la maison terre/paille

D'après les occupants, la maison en terre et paille étudiée consomme une bouteille de gaz butane par semaine pour le chauffage d'appoint, à savoir 1 kg de butane dégage une énergie de 12,7 kWh. La capacité d'une bouteille de 13 kg est évaluée à 165,1 kWh. Une heure d'utilisation est équivalente à 250 g de gaz consommé. La maison consomme donc en chauffage d'appoint 165,1 kWh pour 52 heures de chauffe par semaine et près de 660,4 kWh par mois. Sa consommation en hiver atteint 2421,43 kWh. Par rapport au climat de la région, c'est une quantité importante causée par les déperditions par renouvellement d'air. Les pièces donnent sur la cour, à chaque ouverture de leur porte, une déperdition de chaleur est provoquée. Les murs ne sont pas aussi bien étanches aux airs parasites, au niveau des menuiseries (ouverture des persiennes pour l'éclairage). À cause de la ventilation, les effets d'évaporation de chaleur latente de surface (rafraîchissement l'été, apport de chaleur l'hiver) de cette enveloppe hygroscopique ne seront pas très significatifs sur l'économie d'énergie. La paille et la terre non seulement d'empreintes énergétique et carbonique inférieures par m² de paroi et de performance thermique nettement meilleure que les briques cuites ou les blocs de béton, mais permettent également d'améliorer la consommation d'énergie dans les bâtiments [González, 2014].

7-2. Etude de la consommation énergétique de la maison pierre

La consommation énergétique en gaz de ville de la maison en pierre en hiver est élevée (6560 Thermies : 7627,46 kWh). La grande part de cette quantité est attribuée au chauffage (6218,24 kWh), parce que la consommation énergétique en été en absence de ce dernier ne dépasse 1409,22 kWh. Trois formes d'énergie domestique sont assurées par le gaz naturel, à savoir, le chauffage, l'eau chaude sanitaire et la cuisson. Le chauffage représente donc le plus grand pourcentage, évalué à 80%. Les 20% restant sont accordées à 15% pour l'eau chaude sanitaire et 5% pour la cuisson. En électricité, la consommation de la maison est stable sur l'année avec un maximum de 423 kWh enregistré en mi-saison, Figure II-62. Cette énergie est utilisée pour l'éclairage, l'électroménager, l'audio-visuel et l'informatique (voir Annexe A-2). Il peut être remarqué que la consommation du gaz dans la maison en pierre fait quatre fois celle de l'électricité en été et mi-saison, et 18 fois celle en hiver.

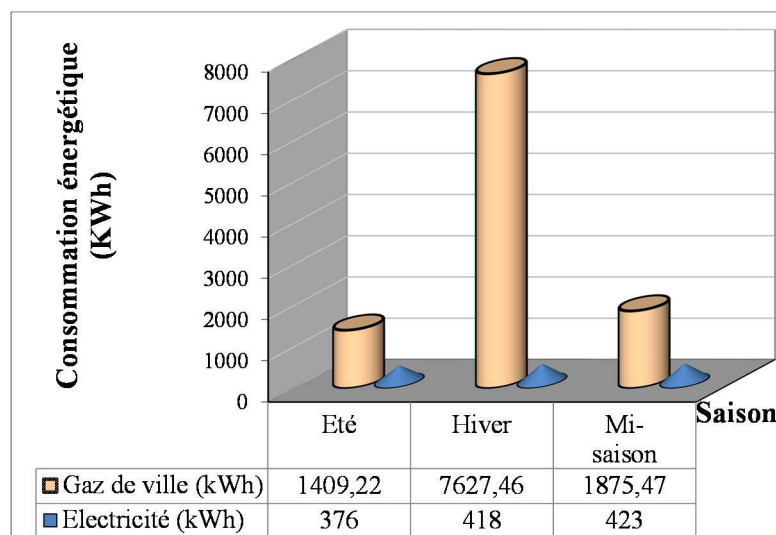


Figure II-62 : Consommation énergétique annuelle de la maison en pierre

7-3. Etude de la consommation énergétique de la maison plaque de plâtre

La maison en plaque de plâtre utilise les mêmes formes d'énergie domestique aux mêmes pourcentages que la maison en pierre. À cause du climat froid montagnoux, sa consommation en gaz est très importante en hiver (8641 m³), dû au chauffage. En électricité, sa consommation est également stable sur l'année avec un maximum de 261 kWh enregistré en mi-saison (Figure II-63, voir Annexe A-2). Notant que 1 m³ de gaz naturel comprend entre 9,5278 et 12,7931 kWh. En Algérie, la tarification de 1 m³h consommé est estimée à 0,168 Da en première tranche. Et si la consommation dépasse 1125 m³h, le 1 m³h est évalué à 0,324 Da.

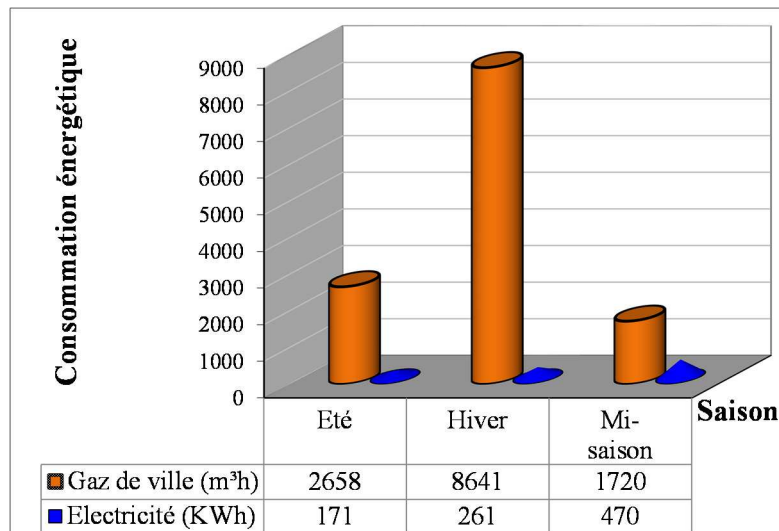


Figure II-63 : Consommation énergétique annuelle de la maison en plaques de plâtre

7-4. Etude de la consommation énergétique de la maison à ossature bois

En été, la consommation d'électricité dans la maison à ossature bois est seulement celle engendrée par le ballon pour la production de l'eau chaude sanitaire. Cette consommation est très stable, évaluée à 128,85 kWh (en juillet). Les pics de puissance sont enregistrés aux moments de prise des douches quotidiennes.

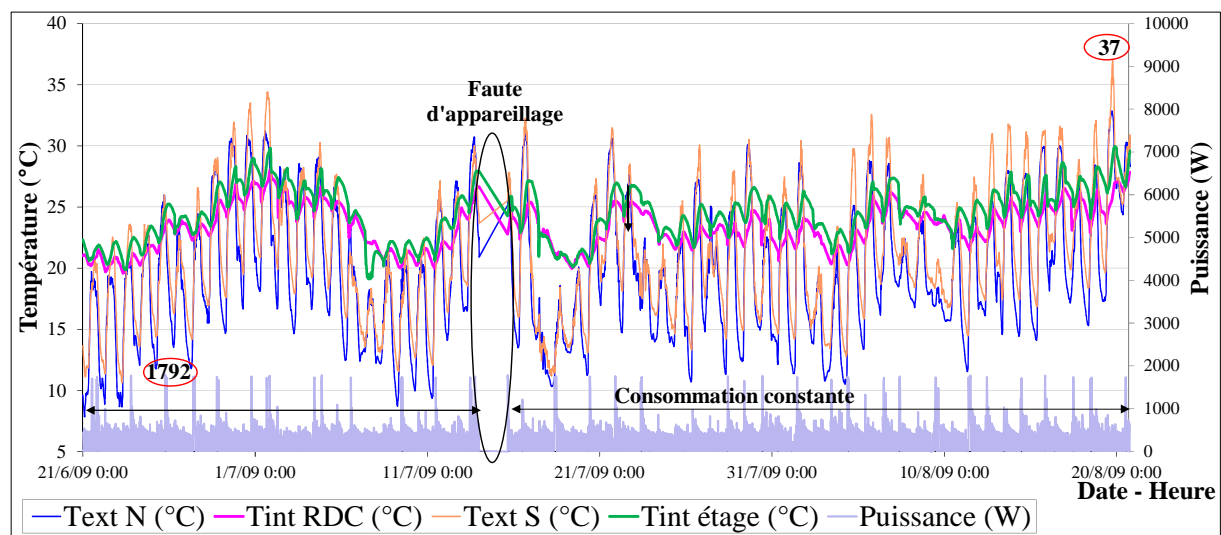


Figure II-64 : Variation horaire des températures intérieures/extérieures et la puissance électrique consommée, saison d'été « maison à ossature bois »

En hiver, en plus de la consommation du ballon s'ajoute la consommation du convecteur électrique pour le chauffage où les pics de puissance sont notés jusqu'à 7824 W, Figure-II-65.

Toutefois, les baisses des watts consommés correspondent à la mise en marche du poêle à bois provoquant les hausses de températures en étage et en RDC. La consommation d'électricité en saison d'hiver (du 21 décembre au 21 mars) est estimée à 2205,14 kWh, à savoir, la quantité du bois de combustion n'est pas incluse au taux global de consommation. La maison à ossature bois consomme plus d'énergie que prévu, en raison de l'étanchéité.

L'accumulation de l'humidité dans les matériaux en bois de l'enveloppe, pendant les périodes d'occupation, permet de réduire les besoins en chauffage [Simonson et al, 2002], [Hameury, 2005]. En saison d'été, ces matériaux sont capables de réduire le taux d'humidité et l'enthalpie intérieure [Zhang et al, 2012], [Li et al, 2012] [Janssen, Christensen, 2013]. Et même en toutes saisons, l'effet du tampon d'humidité peut réduire considérablement l'amplitude des fluctuations de l'humidité relative [Jun Moon et al, 2014], et ce, sans avoir recours à la ventilation mécanique. Celle-ci génère une surconsommation électrique. Si, commercialement, la ventilation mécanique hygroréglable B est affichée comme une vraie régulation en fonction de la présence ou non d'activité dans la maison, les recherches scientifiques montrent un peu le contraire. Ses ventilateurs consomment, le balayage est moyen, et elle provoque des déperditions par renouvellement d'air (sous forme de chaleur sensible) qui font augmenter sensiblement la facture de chauffage. En termes de qualité de l'air intérieur, elle génère une accumulation de polluants spécifiques comme le Alpha pinène (C_5H_8)₂ ($2.09 C_{\text{moy}}/C_{\text{Ref}}$) [Koffi, 2009]. Egalement, le confort n'est pas toujours au rendez-vous. Il se produit souvent un effet de courant d'air froid, notamment près des fenêtres.

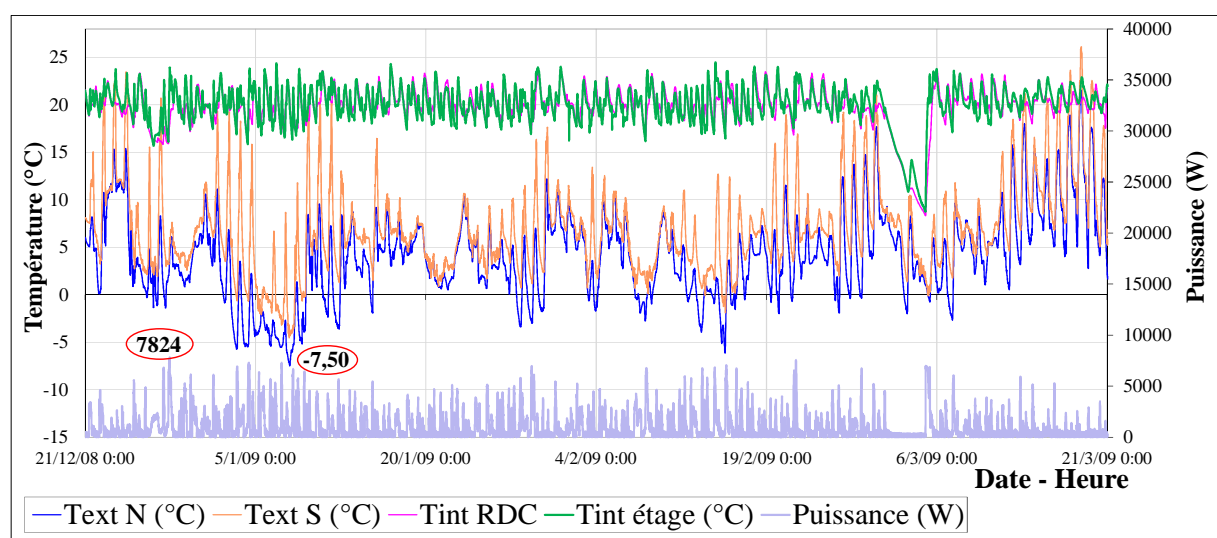


Figure II-65 : Variation horaire des températures intérieures/extérieures et la puissance électrique consommée, saison d'hiver « maison à ossature bois »

8. Simulation des transferts de chaleur et de masse via TRNSYS

L'inertie thermo-hydrigue de l'enveloppe hygroscopique est donc une option qui peut affecter sensiblement le confort thermique et la consommation énergétique. Afin de mettre ses effets en exergue, des simulations numériques dynamiques du comportement thermo hydrique des maisons investiguées ont été menées. Le logiciel TRNSYS version 17, (2009) a été utilisé à cet effet.

TRNSYS (TRaNsient SYstem Simulation Program : programme de simulation de systèmes transitoires) est un logiciel de simulation thermique et énergétique en régime dynamique, multi et mono zone. Il a été conçu au laboratoire « Solar energy » à l'université Wisconsin Madison. Il est structuré de manière modulaire, avec 50 modules environ ; ce qui fait son originalité. La première version publique (6.0) établit en mars 1975, était à l'origine de la thèse de Sanford Klein. TRNSYS est aujourd'hui en perpétuelle évolution, amélioré par une équipe conjointe composée du Laboratoire d'Energie Solaire (SEL) de l'Université du Wisconsin-Madison, du Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB), France, du Transsolar Energietechnik GmbH à Stuttgart, en Allemagne et des spécialistes des systèmes d'énergie thermique (TESS) de Madison, au Wisconsin. C'est un solveur par substitution successive ; sa technique modulaire permet de fractionner le problème complexe en plusieurs petits problèmes, avec une formulation générale où le problème est réduit à la formulation de modèles mathématiques et à la description des interactions entre modèles. Avec son environnement graphique Simulation Studio (qui a remplacé 11SiBat), TRNSYS permet de simuler le comportement dynamique d'un système complexe, tel un bâtiment, de façon relativement fine. La pertinence des modèles demeure toutefois pondérée par le caractère oscillatoire de la contrainte climatique et substitue néanmoins des différences entre simulation /expérimentation.

Des simulations du comportement thermo hydrique des maisons terre/paille et pierre ont été testées via le modèle multizone « Type 56 », en entrant un fichier météo propre à chaque région (voir annexe A-3) et les enregistrements intérieures. Pour chaque simulation, il a été nécessaire de disposer au moins de deux composants. Le premier relatif au fichier météo, incluant les données météorologiques et le calcul de l'ensoleillement des parois. Le deuxième traite les échanges de chaleur dans le bâtiment. Ces composants sont identifiés dans le fichier DECK (programme propre à la simulation) généré par TrnsysStudio et le fichier *.B17 ou appelé *.bui en version 16 (description du bâtiment) par TRNBuild, Figure II-66.

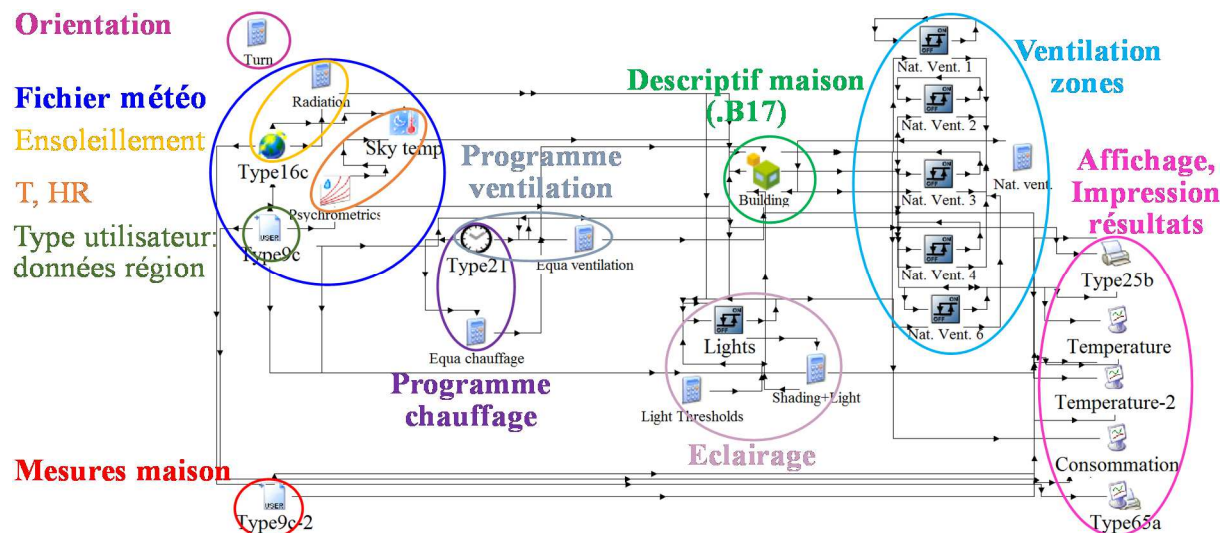


Figure II-66 : Schéma du programme de simulation (.tpf) sur TRNSYS avec le fichier bâtiment multi zones, le fichier météo et les mesures intérieures « maison en pierre »

Avec le TYPE 56 (multi zones), il a été fait appel à plusieurs autres types : TYPE16 (processeur d'ensoleillement), TYPE33 (diagramme psychrométrique), TYPE69 (température effective du ciel pour l'échange du rayonnement à grandes longueurs d'ondes), TYPE9 (lecteur de données), TYPE21 (valeurs de temps), TYPE2 (ON/OFF contrôleur différentiel ; stratégie de contrôle), TYPE65 (affichage de résultats) et le TYPE25 (impression des données).

8-1. Comparaison mesures/ simulation, maison en pierre

La confrontation entre températures mesurées au niveau de la chambre S.O en été à celles numériques, fournies par TRNSYS, donne de faibles écarts, Figure II-67. Ceci valide l'effet de l'inertie thermique dans l'écrasement des températures maximales externes et l'atténuation de l'onde thermique. Les écarts sont également minimes sur le cycle annuel. Notons que les conditions intérieures de scénarios d'occupation, température et humidité de la zone ne peuvent être les mêmes d'un mois à l'autre. La simulation du comportement hygrothermique, sur une plus courte période, montre des écarts très négligeables ($0,8^{\circ}\text{C}$ max) dans la plage de précision du capteur de mesure LogTag ($\pm 1^{\circ}\text{C}$), Figure II-68. En revanche, si les amortissements sont presque égaux, les déphasages simulés sont plus courts. Ceci peut être expliqué par l'écueil reconnu du TYPE56 utilisant la méthode des fonctions de transfert (la transformée en Z) de Mitalas, (1970) pour déterminer la réponse thermique d'une paroi. Cette méthode pose des problèmes pour les parois à forte inertie. Si le choix du pas de temps de calcul est très court ($0,25\text{h}$ notre cas), des erreurs de calcul peuvent être générées.

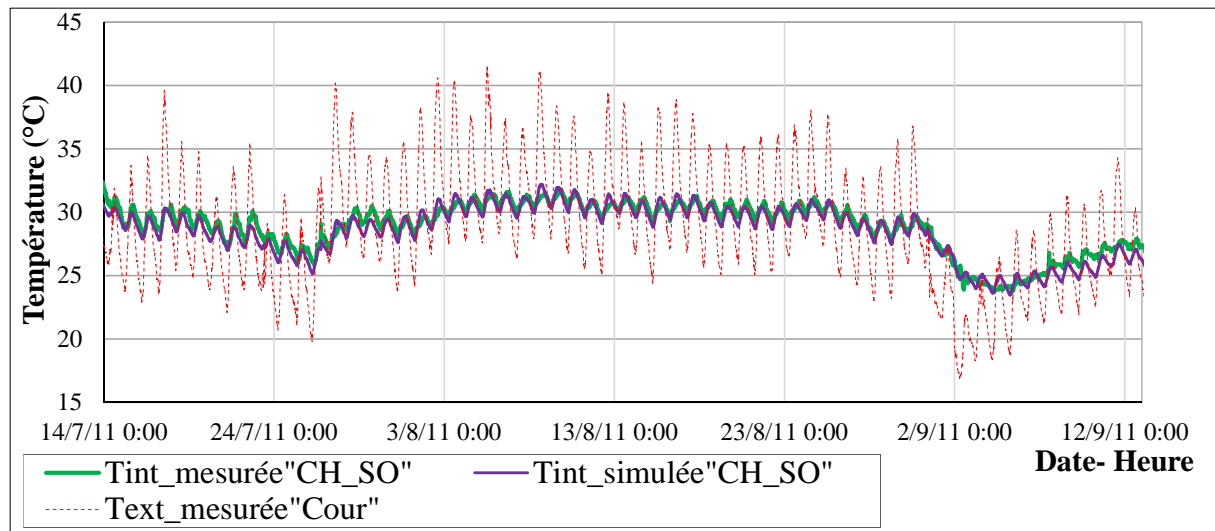


Figure II-67 : Comparaison entre températures mesurées et simulées par TRNSYS, période été (14/7 au 13/9/2011) « maison en pierre »

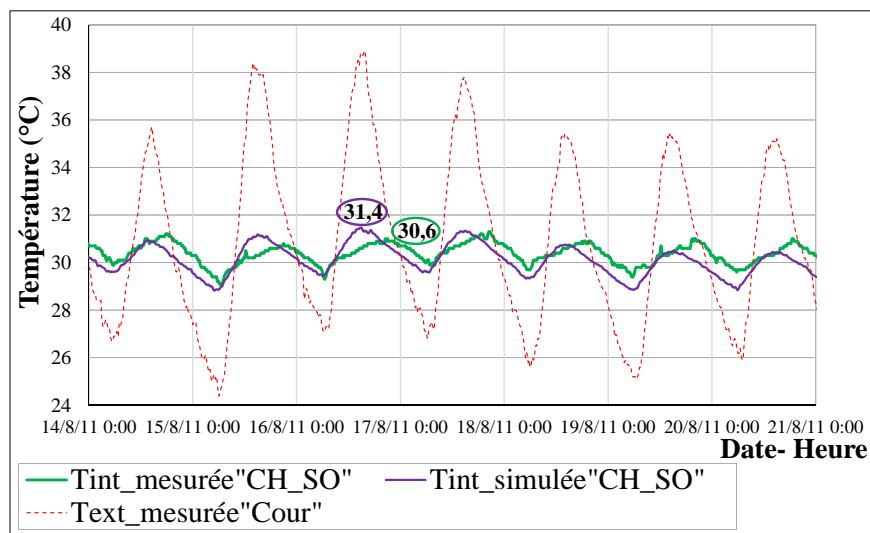


Figure II-68 : Comparaison entre températures mesurées et simulées par TRNSYS, semaine d'été (14 au 21/8/2011) « maison en pierre »

Malgré que le modèle simple « capacitif » d'humidité (capacitance Humidity model) du type 56 (bâtiment multi-zone) de TRNSYS ne tienne pas compte des transferts d'humidité dans les murs, mais seulement de la possibilité de stockage/diffusion d'humidité dans une zone tampon (voir annexe A-4), les écarts entre simulation et mesures ne sont pas très importants, Figure II-69. Sur une semaine, les écarts sont pour la plupart du temps inférieurs à $\pm 3\%$ HR, attribués à la précision du capteur LogTag ($\pm 3\%$). Les dépassements jusqu'à $8,4\%$ HR d'écart max sont surtout enregistrés en matinée entre 10h-12h. Ces derniers peuvent être impartis soit aux tâches ménagères non introduites dans le modèle, soit à une part d'adsorption/désorption de chaleur latente du parement hygroscopique, Figure II-70.

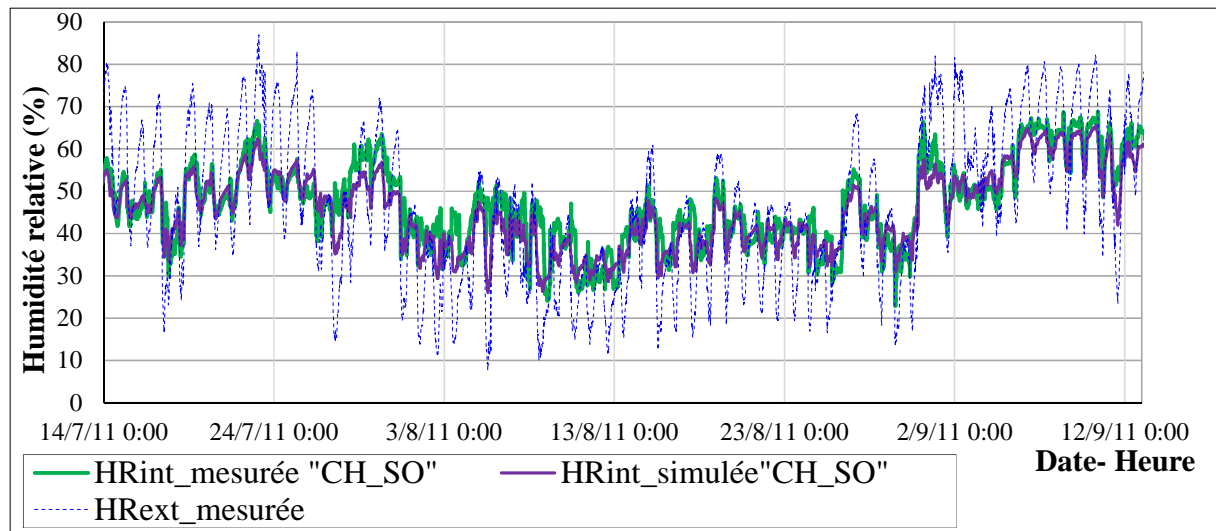


Figure II-69 : Comparaison entre humidités relatives mesurées et simulées par TRNSYS, période été (14/7 au 13/09/2011) « maison en pierre »

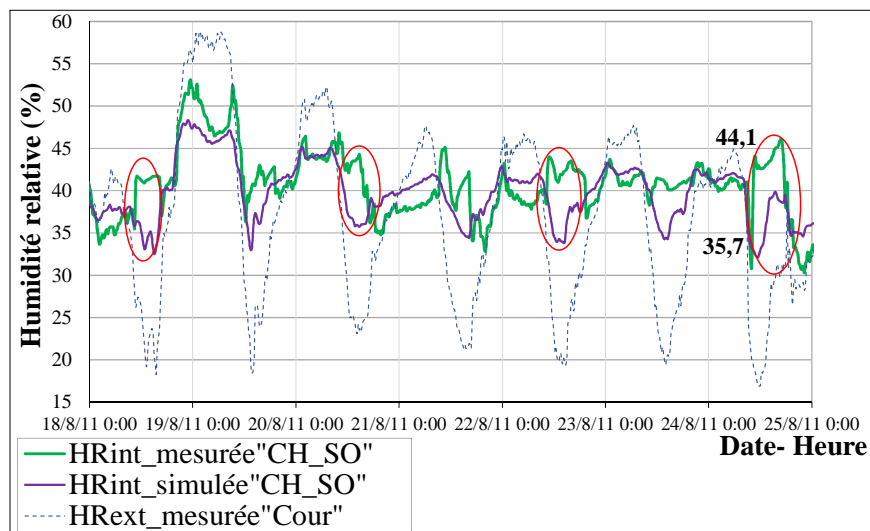


Figure II-70 : Comparaison entre humidités relatives mesurées et simulées par TRNSYS, semaine d'été (18 au 25/8/2011) « maison en pierre »

Le second modèle d'humidité (Buffer Storage Model) de TRNSYS a été aussi appliqué, mais uniquement au niveau de la chambre S.O, dotée d'un parement hygroscopique (enduit de plâtre). Le reste de pièces (peintes en laque) a été modélisée comme précédemment. Même avec le modèle où l'effet du tampon hygroscopique des surfaces est considéré (voir annexe A-4), les résultats sont presque identiques, Figure II-71. La variation de l'humidité intérieure du buffer reprend celle du modèle simple, avec un écart max de 2,8%HR et 8,3%HR avec les mesures. Les deux modèles d'humidité de TRNSYS ne considèrent pas les lois de diffusion dans le matériau hygroscopique. Cependant, les faibles écarts avec les mesures confirment que l'effet de l'inertie hydrique du matériau hygroscopique sur l'ambiance à l'échelle de cette maison n'est pas aussi imposant que celui de l'inertie thermique.

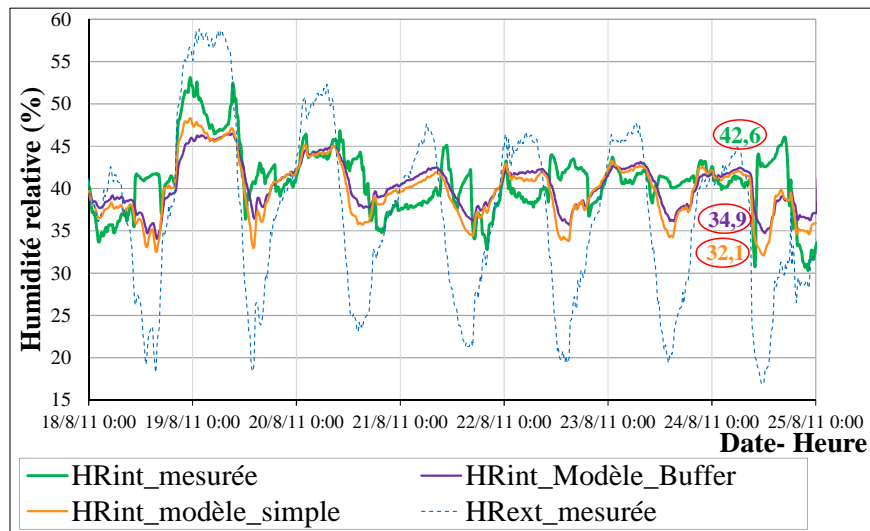


Figure II-71 : Variation de l'humidité relative mesurée et simulée par les modèles simple et buffer, semaine d'été (18 au 25/8/2011) « maison en pierre »

8-2. Comparaison mesures/ simulation : maison en terre et paille

Puisque les propriétés thermophysiques du matériau n'ont pas été mesurées, plusieurs valeurs ont été testées, prises à la base de matériaux semblables présentées dans [Goodhew et Griffiths, 2005], [Collet, 2006] [CSTB, 2009] [LNE, 2014]. Comme pour la maison en pierre, la non prise exacte des déphasages par le modèle cause des écarts avec les mesures jusqu'à 1,8°C max, Figure II-72.

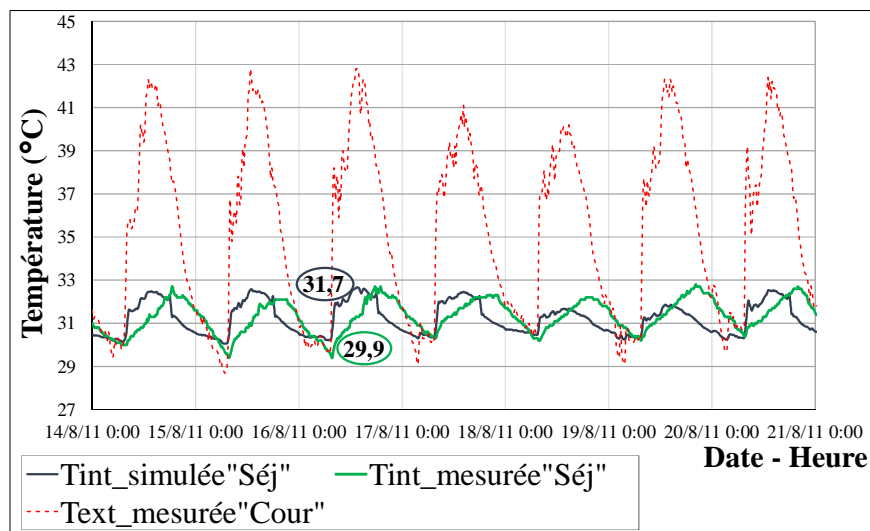


Figure II-72 : Comparaison entre températures mesurées et simulées par TRNSYS, semaine d'été (14 au 21/8/2011) « maison en terre et paille »

En été, la simulation du comportement hydrique de la maison donne des écarts plus importants avec les mesures, et ce, jusqu'à 15,9 %HR max (Figure II-73). Cela peut confirmer que plus le matériau est hygroscopique, plus le modèle sous-estime le taux d'humidité intérieure. Comme il ne s'agit pas d'un modèle de transfert couplé, les conditions qui valident le comportement thermique ne le permettent pas en hydrique. Néanmoins, les vrais scénarios d'occupation d'espace ne sont pas bien introduits dans le modèle, comme les stratégies de rafraîchissement (80l d'eau versée dans la pièce). Les écarts sont essentiellement enregistrés le matin, lors de ces tâches (voir ellipses rouges). Si ces écarts correspondent, en grande partie à cette quantité d'eau, la part du matériau hygroscopique dans la diffusion hydrique pourra être minime dans ce cas par rapport à celle de la ventilation. Plus on augmente le taux d'infiltration dans le modèle, plus le taux d'humidité baisse.

En hiver, la capacité d'absorption d'humidité ou l'effet de l'inertie hydrique de l'enveloppe hygroscopique dans la modération de la variation de l'humidité intérieure est bien affirmée par les mesures. Le modèle donne de fortes amplitudes de l'humidité ambiante, Figure II-74.

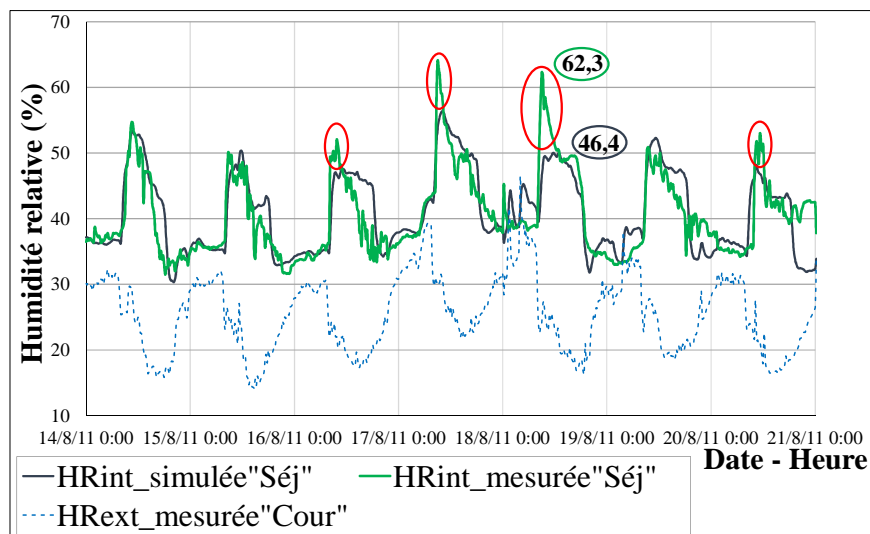


Figure II-73 : Comparaison entre humidités relatives mesurées et simulées par TRNSYS, semaine d'été (14 au 21/8/2011) « maison en terre et paille »

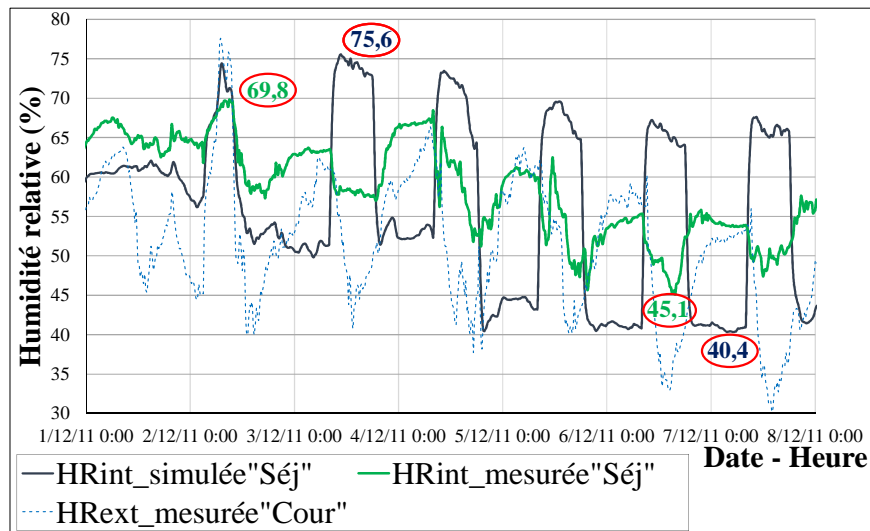


Figure II-74 : Comparaison entre humidités relatives mesurées et simulées par TRNSYS (modèle simple), semaine d'hiver (01 au 08/12/2011) « maison en terre et paille »

L'analyse de sensibilité effectuée au niveau des maisons prouve que la simulation du comportement thermo hydrique de l'enveloppe est très sensible aux taux de renouvellement d'air et aux infiltrations. La densité et la chaleur spécifique de l'air ont aussi un effet non négligeable. Elles changent en fonction de la température de la zone. D'autres part, les données matériaux de propriétés thermophysiques, les conditions d'initialisation, les changements dans les conditions ambiantes relatives aux apports de chaleur (soleil, apports internes) avec le comportement de l'occupant influent sur les résultats du modèle. En effet, les données précises sont nécessaires afin de simuler les cas réalistes de manière exacte. Par ailleurs, si les deux modèles d'humidité de TRNSYS ne reprennent pas l'évolution hydrique jaugée par les mesures, c'est surtout dû à l'effet de la ventilation et les scénarios d'occupation non bien entrés. De plus, les mécanismes de transport d'humidité dans le matériau ne sont pas pris en compte dans les modèles. Ceci peut conduire à une sous-évaluation des consommations de chauffage et/ou de climatisation dans la simulation énergétique du bâtiment [Jun Moon et al, 2014]. L'utilisation du buffer présente des désagréments non clarifiés dans le manuel [Flory-Celini, 2008]. Sa difficulté réside dans la détermination de la masse de chaque surface de la paroi qui dépend de la valeur de la profondeur effective de pénétration de l'humidité. Le couplage avec COMIS permet de définir un réseau aéraulique (transferts d'air et d'humidité entre les zones), mais là aussi, l'humidité stockée dans les murs n'est pas prise en compte. Si le but est de mesurer le taux d'humidité dans le mur, il faudra ajouter un nouveau modèle. Celui-ci devra en plus être couplé et intégré avec le modèle de bâtiment existant, ce qui n'est pas une extension facile.

Conclusion

Dans ce chapitre, une campagne expérimentale lourde de monitoring de constructions constituées de matériaux hygroscopiques a été présentée. L'interprétation des résultats de caractérisation thermo hydrique de l'échelle de la maison habitée n'a pas été toujours aisée. Plusieurs paramètres entrent en jeu et l'interprétation devient complexe lorsqu'ils sont interdépendants. La difficulté est liée, d'une part, à la taille et la complexité géométrique de l'objet étudié (la maison habitée). D'autre part, elle dépend de nombreux facteurs aléatoires, tels que les conditions climatiques, le comportement des occupants et la nature des matériaux utilisés dans l'enveloppe.

Le double enjeu de l'étude thermo hydrique du bâtiment (le confort des usagers et la consommation énergétique) nécessite une étude plus approfondie des différents phénomènes. Une analyse multi critères, au cas par cas, peut permettre de mieux définir leurs impacts réels.

Des investigations menées, il peut être récapitulé que le comportement thermo hydrique de l'enveloppe hygroscopique à l'échelle de la maison habitée est très difficile à caractériser. Il dépend à la fois de la quantité et le type des matériaux à l'intérieur, le climat extérieur, le débit de ventilation et la vitesse de production de l'humidité, qui également dépend de la température et l'humidité relative intérieure, rejoignant l'avis de [Osanyintola et al, 2006]. Selon Orosa et Oliveira, (2009), la capacité des matériaux à freiner les changements diurnes dans l'humidité intérieure découle de leur épaisseur active, la perméabilité à la vapeur et la capacité de stockage d'humidité. Les expériences pour l'évaluation de ces paramètres à l'intérieur de la maison habitée sont plus rares car plus difficiles à analyser du fait du grand nombre de phénomènes qui se développent simultanément, voire l'impact de la ventilation naturelle dans les maisons étudiées. De plus, le mobilier peut participer de manière significative au phénomène de tampon hygroscopique [Svennberg et al, 2004] [Padfield et Jensen 2011] et qui n'a pas aussi été analysé. Cependant, il a pu être constaté que les matériaux locaux « travertin, terre/paille » adaptés aux climats locaux étaient à l'origine de l'amélioration du confort hygrothermique. Il a été démontré que l'inertie thermique assure l'équilibre thermique. En été, elle permet de lisser les flux thermiques et décréter les températures extrêmes. En Hiver, elle évite les chutes trop brutales de la température, et met bien en évidence la gestion optimale des apports de chaleur.

En revanche, l'effet de l'inertie hydrique dans l'équilibre hygrométrique estival et hivernal a été plus marqué dans le cas de la maison en terre/paille, en raison de la quantité importante des matériaux hygroscopiques présents dans l'ambiance. En été, le transfert de masse et les

échanges convectifs par changement de phase en surface du matériau ont généré des absorptions et des émissions de chaleur latente qui ont particulièrement participé à la sensation du rafraîchissement chez les occupants. En hiver ces absorptions/émissions, en plus de la régulation de l'humidité intérieure, ont assuré un certain apport additionnel de chaleur en période de chauffage, mais qui n'a pas été très bien constaté.

L'effet du parement hygroscopique (enduit de plâtre/mortier de chaux), quant à lui, a été vérifié au cas de la maison en pierre, permettant de réduire la température ambiante en été de 1,5 °C par rapport à un parement non hygroscopique (peinture en laque).

L'étude de la consommation énergétique des maisons d'Algérie ou de France montre qu'elle est élevée en hiver, où la plus grande part est impartie au chauffage. La consommation la plus élevée était au niveau de la maison à faible inertie thermique (en plaques de plâtre) et la plus étanche (ossature bois). Jusqu'à présent, en Algérie, on s'est focalisé sur la problématique du confort d'été, or celle d'hiver est aussi persistante mêmes sous climats chauds.

D'après les simulations TRNSYS et les résultats du monitoring, il peut être conclu qu'une maison hygroscopique à 100 % n'existe pas. L'effet de la ventilation est plus imposant.

Enfin, la comparaison des résultats de mesures des différentes maisons n'a pas été procédée. Cette comparaison n'est pas triviale du fait du changement des conditions extérieures et intérieures d'une maison à une autre. Cependant l'analyse des résultats du monitoring a permis de mettre en évidence plusieurs différences significatives liées à l'enveloppe et la nature des matériaux utilisés.

Afin de consolider l'échelle de caractérisation des maisons habitées, via l'approche monitoring, et pour contourner l'imperfection due aux effets de l'occupant, ventilation naturelle, etc. la suite de ce mémoire va faire l'objet de trois autres échelles distinctes ; à savoir, le matériau, la paroi et la structure monozone de type cellule-test. Pour pallier aux difficultés rencontrées au niveau de la maison habitée, les trois échelles seront menées avec une maîtrise de diverses sollicitations.

Mais avant tout, ce chapitre a montré les faiblesses et les limites actuelles des approches dynamiques proposées par les logiciels de simulation non couplés. Dans le chapitre qui suit, une alternative numérique est développée. Basée sur un modèle de transfert de chaleur et de masse couplé dont l'implémentation est dans un code aux éléments finis et/ou aux différences finies, elle permettra de proposer des simulations numériques mieux maîtrisées.

Chapitre III

Développement des modèles de transferts couplés

*« Tout obstacle renforce la détermination. Celui qui s'est fixé un but
n'en change pas. »*

Léonard De Vinci

Introduction

L'étude multi-échelle envisagée nécessite l'utilisation d'outils numériques suffisamment souples pour pouvoir modéliser les phénomènes de transferts couplés. Et cela aussi bien à l'échelle du matériau, qu'à celle de la paroi, ou encore de la zone d'un bâtiment, tout en préservant une certaine ouverture quant à l'introduction des propriétés de matériaux complexes, telles que les hystérésis de sorption par exemple. Les modèles de transfert non couplé dans les logiciels, évoqués précédemment, n'offrent pas cette souplesse à toutes les échelles, un outil numérique a donc été développé au sein du laboratoire GEMH et dans le cadre de cette thèse.

Le présent chapitre détaille ce développement, effectué selon deux approches. La première utilise les Différences Finies (DF), programmées en VBA dans le logiciel Excel. La deuxième est implantée dans l'environnement aux Eléments Finis (EF) de Cast3M, (2014). Une confrontation entre les sorties des deux modèles sur des problèmes identiques permet de valider les deux approches, et donc de garantir l'absence d'erreurs algorithmiques ou de programmation. Les outils développés consentent d'abord l'étude des transferts hygrothermiques dans un domaine de matériau soumis à des conditions aux limites connues, changeantes en température et en hygrométrie. L'extension est ensuite faite aux problèmes uni-zones, pour lesquels les évolutions des conditions hygrothermiques de l'ambiance interne à la zone sont des inconnues, et qui vont être déterminées en tant que sorties du modèle.

Dans un souci de progressivité, l'approche 1D par DF sera d'abord introduite. Il suivra une présentation de l'implantation généralisée au 3D dans l'environnement aux EF Cast3M. Enfin, une méthode d'identification paramétrique couplée à ces modèles sera abordée.

1. Modélisation numérique d'une paroi par Différences Finies

1-1. Principes généraux de discrétisation

Dans un premier temps, les différents principes de discrétisation sont détaillés et appliqués à l'équation du bilan de la chaleur, en unidimensionnel dans le cas d'une paroi plane.

1-1-1. Discrétisation spatiale

Dans le cas général, le mur pourra être découpé en « tranches » d'épaisseurs inégales (Figure III-1). Ce choix permet de raffiner davantage la discrétisation de zones telles que le voisinage des surfaces, qui sont le siège d'importants gradients des champs thermiques ou hydriques. Le

bilan des densités surfaciques du flux de chaleur par conduction de la tranche comportant le nœud n° i résulte de la différence entre le flux entrant par la gauche φ_g et celui sortant par la droite φ_d :

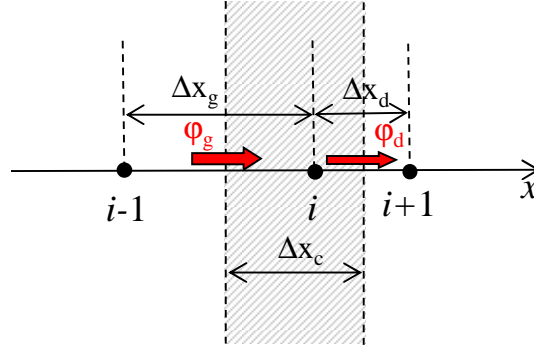


Figure III-1 : Discrétisation spatiale

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)_i \approx \frac{\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)_d - \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)_g}{\Delta x_c} \approx \frac{1}{\Delta x_c} \left[\frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2} \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta x_d} - \frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{2} \frac{T_i - T_{i-1}}{\Delta x_g} \right] \quad (\text{III.1})$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)_i \approx \frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{2 \Delta x_c \Delta x_c} T_{i-1} - \frac{2}{2 \Delta x_c} \left(\frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{\Delta x_g} + \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{\Delta x_d} \right) T_i + \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2 \Delta x_d \Delta x_c} T_{i+1} \quad (\text{III.2})$$

1-1-2. Discrétisation temporelle

Considérant un intervalle de temps τ , la dérivée temporelle de la température en un point i peut s'approximer comme suit:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i \approx \frac{T_i^{t+\tau} - T_i^t}{\tau} \quad (\text{III.3})$$

La notation T_i^t désigne la température au point i à l'instant t .

Cette approximation peut être considérée comme valable à n'importe quel instant intermédiaire $t + \theta\tau$, compris entre l'instant t et l'instant $t + \tau$ (avec $0 \leq \theta \leq 1$) (Figure III-2). En supposant une évolution linéaire de la dérivée temporelle de la température entre les deux instants, on écrit :

$$\left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i^{t+\theta\tau} \approx (1 - \theta) \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i^t + \theta \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right)_i^{t+\tau} \approx \frac{T_i^{t+\tau} - T_i^t}{\tau} \quad (\text{III.4})$$

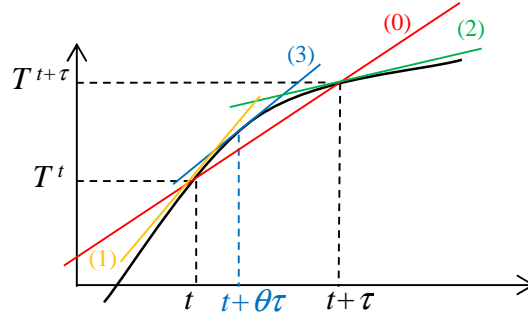


Figure III-2 : Différentes dérivées temporelles sur un intervalle de temps

Cette approche, classiquement utilisée en DF comme en EF, est généralement connue sous le nom de « Theta-méthode ». Des cas particuliers consistent à considérer que cette écriture sous forme de différence finie (pente de la droite 0) correspond à la dérivée :

- à l'instant t (droite 1) : $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i^t \approx \frac{T_i^{t+\tau} - T_i^t}{\tau}$ ($\theta = 0$, méthode **explicite**)
- à l'instant $t + \tau$ (droite 2) : $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)_i^{t+\tau} \approx \frac{T_i^{t+\tau} - T_i^t}{\tau}$ ($\theta = 1$, méthode **implicite**)

à l'instant $t + \tau/2$ (droite 3) : ($\theta = 1/2$, méthode de **Crank-Nicolson**, (1947), [Crank, 1975]).

1-1-3. Bilan thermique de la tranche

Reprenant l'équation (I.16), le bilan thermique de la tranche centrée sur le point i est écrit en considérant que, pendant un intervalle de temps τ , le déséquilibre des flux thermiques entrant et sortant par conduction, additionné de la chaleur de sorption échangée, se manifeste par une variation d'énergie interne de la tranche sous forme de chaleur sensible (voir Figure I-14). L'équation s'écrit donc, dans le cas général :

$$\begin{aligned}
 (\rho C)^* \frac{T_i^{t+\tau} - T_i^t}{\tau} \approx (1 - \theta) & \left[\frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{2\Delta x_g \Delta x_c} T_{i-1}^t - \frac{1}{2\Delta x_c} \left(\frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{\Delta x_g} + \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{\Delta x_d} \right) T_i^t + \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2\Delta x_d \Delta x_c} T_{i+1}^t + H_s B_v^t \right] \\
 & + \theta \left[\frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{2\Delta x_g \Delta x_c} T_{i-1}^{t+\tau} - \frac{1}{2\Delta x_c} \left(\frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{\Delta x_g} + \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{\Delta x_d} \right) T_i^{t+\tau} + \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2\Delta x_d \Delta x_c} T_{i+1}^{t+\tau} + H_s B_v^{t+\tau} \right]
 \end{aligned}
 \tag{III.5}$$

Où le terme B_v^t désigne le bilan de diffusion de vapeur (ou quantité de vapeur concernée par le changement d'état) de la tranche à l'instant t (voir plus loin son calcul détaillé dans l'équation hydrique) :

$$B_v^t = \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial (Hr p_{vs})}{\partial x} \right)^t \quad (\text{III.6})$$

Si $B_v^t > 0$ alors il rentre plus de vapeur dans la tranche qu'il n'en sort, et par conséquent la tranche est le siège d'une adsorption, et d'une production de chaleur de sorption.

Si $\theta=0$, chaque nouvelle température $T_i^{t+\tau}$ peut se déduire directement des températures des nœuds à l'instant t , d'où le nom de « méthode explicite ». Dans le cas contraire, l'obtention des nouvelles températures $T_i^{t+\tau}$ nécessite la résolution d'un système linéaire (méthode implicite). La valeur du paramètre de relaxation θ conditionne la convergence ou non de la méthode. Dans le cas d'un pas Δx constant et d'une conductivité λ constante, et si le terme de couplage LB_v est nul, le critère de convergence est le suivant :

- Si $0 \leq \theta < 0.5$, le pas de temps maximal requis pour assurer la convergence est :

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{(2-4\theta)a}, \text{ } a \text{ représentant la diffusivité thermique : } a = \frac{\lambda}{\rho C} \text{ [m}^2\text{.s}^{-1}\text{]}$$

Si $0.5 \leq \theta \leq 1$, la méthode est inconditionnellement stable

1-2. Discrétisation des équations des transferts thermo hydriques

Afin d'éviter tout problème de convergence, les équations des transferts couplés sont développées directement dans un schéma **implicite**.

1-2-1. Equations en partie courante du matériau

L'équation du **bilan thermique** s'écrit alors :

$$(\rho C)_i^* \frac{T_i^{t+\tau} - T_i^t}{\tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right)^{t+\tau} + H_s B_v^{t+\tau} \quad (\text{III.7})$$

En procédant à la discrétisation spatiale, il vient donc :

$$(\rho C)_i^* \frac{T_i^{t+\tau} - T_i^t}{\tau} = \frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{2\Delta x_g \Delta x_c} T_{i-1}^{t+\tau} - \frac{1}{2\Delta x_c} \left(\frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{\Delta x_g} + \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{\Delta x_d} \right) T_i^{t+\tau} + \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2\Delta x_d \Delta x_c} T_{i+1}^{t+\tau} + H_s B_v^{t+\tau} \quad (\text{III.8})$$

D'où, en regroupant les termes de températures aux différents nœuds :

$$\frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{2\Delta x_g \Delta x_c} T_{i-1}^{t+\tau} + \left[-\frac{1}{2\Delta x_c} \left(\frac{\lambda_{i-1} + \lambda_i}{\Delta x_g} + \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{\Delta x_d} \right) - \frac{(\rho C)_i}{\tau} \right] T_i^{t+\tau} + \frac{\lambda_i + \lambda_{i+1}}{2\Delta x_d \Delta x_c} T_{i+1}^{t+\tau} = -\frac{(\rho C)_i}{\tau} T_i^t - H_s B_v^{t+\tau} \quad (\text{III.9})$$

L'équation du **bilan en hydrique** s'écrit, si l'on néglige le terme de diffusion en phase liquide :

$$\rho_s \left(\frac{\partial w}{\partial Hr} \right)_i \frac{Hr_i^{t+\tau} - Hr_i^t}{\tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \frac{\partial (Hr \rho_{vs})}{\partial x} \right)^{t+\tau} = B_v^{t+\tau} \quad (\text{III.10})$$

où le terme de bilan de diffusion de vapeur s'écrit de la manière discrétisée suivante :

$$B_v^{t+\tau} = \frac{\delta_{i-1} + \delta_i}{2\Delta x_g \Delta x_c} p_{vsi-1}^{t+\tau} Hr_{i-1}^{t+\tau} - \frac{p_{vsi}^{t+\tau}}{2\Delta x_c} \left(\frac{\delta_{i-1} + \delta_i}{\Delta x_g} + \frac{\delta_i + \delta_{i+1}}{\Delta x_d} \right) Hr_i^{t+\tau} + \frac{\delta_i + \delta_{i+1}}{2\Delta x_d \Delta x_c} p_{vsi+1}^{t+\tau} Hr_{i+1}^{t+\tau} \quad (\text{III.11})$$

D'où, en regroupant les termes d'humidités relatives aux différents nœuds :

$$\begin{aligned} & \frac{\delta_{i-1} + \delta_i}{2\Delta x_g \Delta x_c} p_{vsi-1}^{t+\tau} Hr_{i-1}^{t+\tau} + \left[-\frac{p_{vsi}^{t+\tau}}{2\Delta x_c} \left(\frac{\delta_{i-1} + \delta_i}{\Delta x_g} + \frac{\delta_i + \delta_{i+1}}{\Delta x_d} \right) - \frac{\rho_s \left(\frac{\partial w}{\partial Hr} \right)_i}{\tau} \right] Hr_i^{t+\tau} + \frac{\delta_i + \delta_{i+1}}{2\Delta x_d \Delta x_c} p_{vsi+1}^{t+\tau} Hr_{i+1}^{t+\tau} \\ & = -\frac{\rho_s \left(\frac{\partial w}{\partial Hr} \right)_i}{\tau} Hr_i^t \end{aligned} \quad (\text{III.12})$$

1-2-2. Equations d'échanges surfaciques

Le matériau échange de la chaleur avec une ambiance de température T_a . On écrit l'équation implicite du **bilan thermique** entre les instants t et $t+\tau$ de la demi-tranche en surface du matériau (Figure III-3), côté gauche, en supposant que la température est uniforme sur cette tranche et égale à T_l .

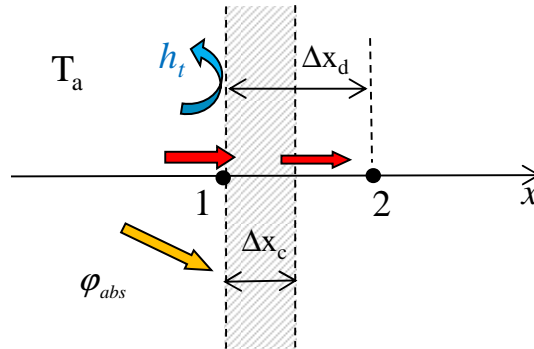


Figure III-3 : Discrétisation spatiale des demi-tranches en surface

$$\Delta x_c (\rho C)_1 \frac{T_1^{t+\tau} - T_1^t}{\tau} = h_t (T_a^{t+\tau} - T_1^{t+\tau}) + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2\Delta x_d} (T_2^{t+\tau} - T_1^{t+\tau}) \quad (\text{III.13})$$

$$+ H_s \left[h_v (Hr_a^{t+\tau} p_{vs a}^{t+\tau} - Hr_1^{t+\tau} p_{vs 1}^{t+\tau}) + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2\Delta x_d} (Hr_2^{t+\tau} p_{vs 2}^{t+\tau} - Hr_1^{t+\tau} p_{vs 1}^{t+\tau}) \right] + \phi_{abs}^{t+\tau}$$

h_t est le coefficient d'échange thermique superficiel [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$]

$\phi_{abs}^{t+\tau}$ désigne la densité du flux thermique d'origine extérieure absorbé par la surface. Il s'agira, par exemple, de la part absorbée du flux solaire incident. En regroupant les termes de températures, l'équation devient :

$$\left[-\frac{1}{\Delta x_c} \left(\frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2\Delta x_d} + h_t \right) - \frac{(\rho C)_1}{\tau} \right] T_1^{t+\tau} + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2\Delta x_d \Delta x_c} T_2^{t+\tau} = -\frac{(\rho C)_1}{\tau} T_1^t - \frac{h_t}{\Delta x_c} T_a^{t+\tau} - H_s B_v^{t+\tau} - \frac{\phi_{abs}^{t+\tau}}{\Delta x_c} \quad (\text{III.14})$$

avec le terme du bilan vapeur suivant :

$$B_v^{t+\tau} = \frac{h_v}{\Delta x_c} (Hr_a^{t+\tau} p_{vs a}^{t+\tau} - Hr_1^{t+\tau} p_{vs 1}^{t+\tau}) + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2\Delta x_d \Delta x_c} (Hr_2^{t+\tau} p_{vs 2}^{t+\tau} - Hr_1^{t+\tau} p_{vs 1}^{t+\tau}) \quad (\text{III.15})$$

L'équation superficielle, côté droit de la paroi, s'écrit de manière analogue.

On procède de la même manière pour l'écriture du **bilan hydrique** de la tranche superficielle :

$$\Delta x_c \rho_s \left(\frac{\partial w}{\partial Hr} \right)_1 \frac{H_1^{t+\tau} - H_1^t}{\tau} = h_v (Hr_a^{t+\tau} p_{vs a}^{t+\tau} - Hr_1^{t+\tau} p_{vs 1}^{t+\tau}) + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2\Delta x_d} (Hr_2^{t+\tau} p_{vs 2}^{t+\tau} - Hr_1^{t+\tau} p_{vs 1}^{t+\tau}) \quad (\text{III.16})$$

D'où :

$$\left[-\frac{1}{\Delta x_c} \left(\frac{\delta_1 + \delta_2}{2\Delta x_d} + h_v \right) p_{vs 1}^{t+\tau} - \frac{\rho_s \left(\frac{\partial w}{\partial Hr} \right)_1}{\tau} \right] Hr_1^{t+\tau} + \frac{\delta_1 + \delta_2}{2\Delta x_d \Delta x_c} p_{vs 2}^{t+\tau} Hr_2^{t+\tau} \quad (\text{III.17})$$

$$= -\frac{\rho_s \left(\frac{\partial w}{\partial Hr} \right)_1}{\tau} Hr_1^t - \frac{h_v}{\Delta x_c} Hr_a^{t+\tau} p_{vs a}^{t+\tau}$$

Notons que, si le choix avait été fait d'écrire l'équation de diffusion hydrique complète, comprenant également le terme de diffusion en phase liquide, il aurait été possible de rajouter au bilan superficiel un terme de flux liquide absorbé, de la même manière que $\phi_{abs}^{t+\tau}$ a été rajouté dans l'équation thermique. Cet ajout permettrait de tenir compte des apports d'eau par mouillage, sous l'effet de la pluie.

1-3. Traitement du couplage

Les équations thermique et hydrique sont fortement couplées : dans le schéma implicite, le terme source $H_s B_v^{t+\tau}$ qui apparaît dans l'équation thermique fait intervenir les humidités relatives inconnues à l'instant $t + \tau$. De la même manière, les pressions de vapeur saturantes $p_{vs}^{t+\tau}$ présentes dans l'équation hydrique dépendent fortement des températures inconnues. Le problème du terme source pourrait à la rigueur être résolu en écrivant un système linéaire dont le vecteur « inconnues » serait constitué à la fois de températures et d'humidités. Toutefois, ceci conduirait à une matrice système non tri-diagonale, ce qui pénaliserait fortement le processus de résolution, comme il sera montré plus loin. De surcroît, la présence dans l'équation hydrique de produits de termes inconnus de la forme $p_{vs}^{t+\tau} H r^{t+\tau}$ empêche la construction d'un système linéaire présentant à la fois des inconnues en température et en humidité.

Un processus de résolution hybride a donc été proposé, consistant à résoudre successivement l'équation thermique puis l'équation hydrique. Ce processus est répété itérativement avec une mise à jour, après chaque résolution, des propriétés physiques d'une part (conductivités thermique et vapeur, capacités thermique et hydrique, etc.) mais aussi de la pression de vapeur saturante et du terme source. Le processus itératif est ainsi répété jusqu'à convergence. Cette dernière sera atteinte lorsque la variation de chaque inconnue (température et humidité) entre deux itérations sera inférieure à une valeur maximale donnée.

Les systèmes à résoudre s'écrivent de la manière matricielle suivante :

$$\text{- Thermique :} \quad [A_t] \{T\} = \{f_t\} \quad (\text{III.18})$$

$$\text{- Hydrique :} \quad [A_w] \{H r\} = \{f_w\} \quad (\text{III.19})$$

Les matrices A_t et A_w ont une structure tri-diagonale permettant de les écrire sous la forme d'une décomposition L.U (L=Lower, U=Upper) qui conduit à un algorithme de résolution extrêmement rapide, avec un temps de calcul simplement proportionnel au nombre d'inconnues (méthode de décomposition de Thomas). L'organigramme de l'algorithme du couplage, appliqué à une paroi est présenté dans la Figure III-4.

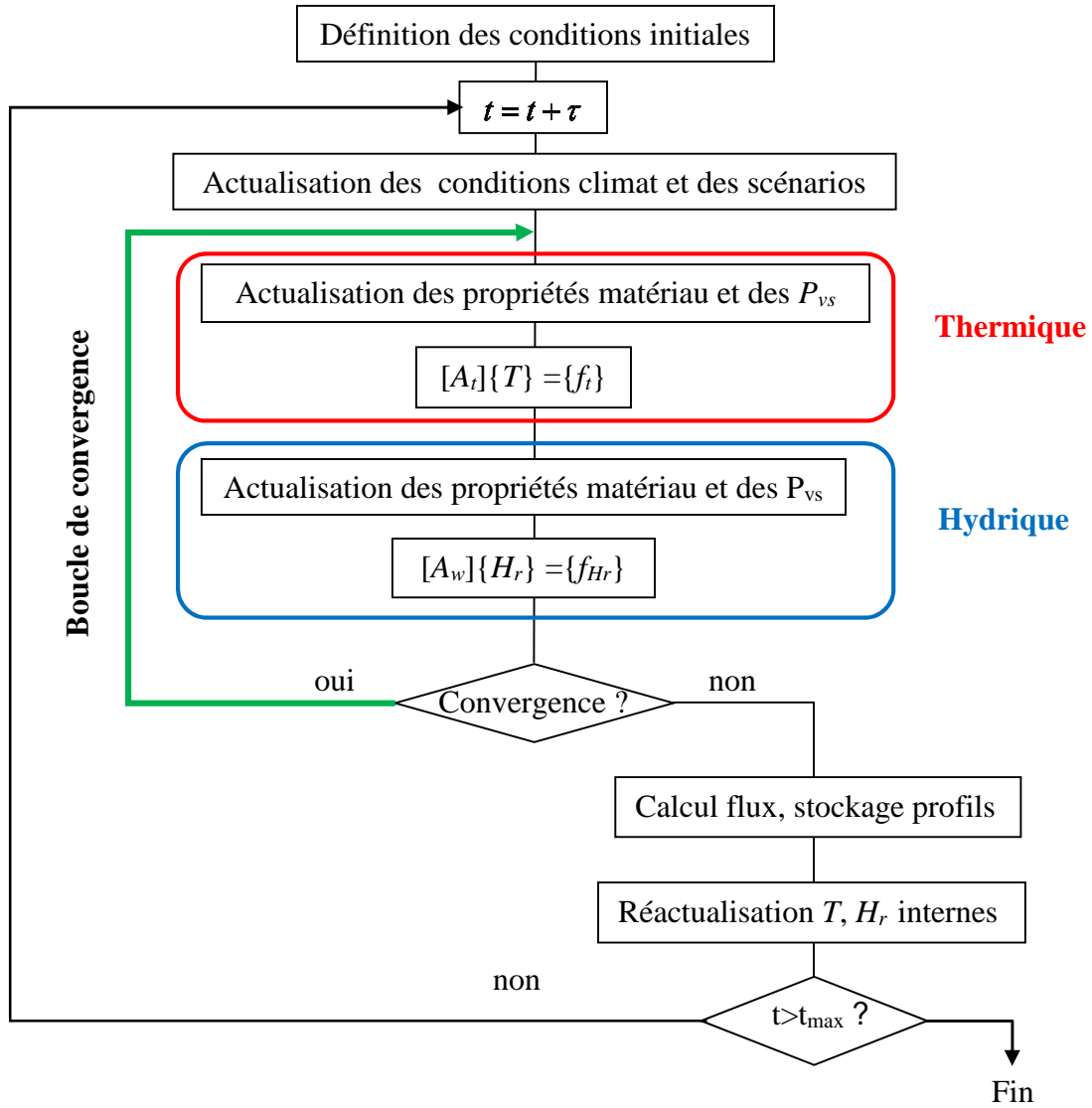


Figure III-4 : Organigramme de l'algorithme de couplage, appliqué à une paroi

1-4. Calculs particuliers

1-4-1. Pression de vapeur saturante

La pression de vapeur saturante p_{vs} s'exprime en Pascal $[Pa]$, et dépend de la température θ $[^{\circ}C]$. La norme NF EN ISO 13788 [CSTB, 2009] retient les formules suivantes :

$$T \geq 273.15K \Rightarrow P_{vs} = 610.5 \exp\left(\frac{17.269T - 4717.03}{T - 35.85}\right) = 610.5 \exp\left(\frac{17.269\theta}{237.3 + \theta}\right) \quad (III.20)$$

$$T < 273.15K \Rightarrow P_{vs} = 610.5 \exp\left(\frac{21.875T - 5975.16}{T - 7.65}\right) = 610.5 \exp\left(\frac{21.875\theta}{265.5 + \theta}\right) \quad (III.21)$$

1-4-2. Isotherme de sorption à une branche et capacité hydrique

Lorsque l'évolution suit de manière certaine la courbe enveloppe d'adsorption ou de désorption, il existe une relation univoque entre Hr et la teneur en eau w . On parle alors d'isotherme à une branche. Le modèle utilise la formulation de Merakeb (2006), (2009) pour déterminer w en fonction de Hr : (équation I.3). Il est en effet nécessaire de calculer à chaque pas le champ de teneur en eau, afin de pouvoir réactualiser les propriétés (λ , δ , $(\rho C)^*$) qui sont sensibles à cette grandeur.

Le terme de capacité hydrique $\xi = \frac{\partial w}{\partial Hr}$ est la pente de l'isotherme de sorption. Comme on dispose d'une expression analytique pour caractériser l'isotherme de sorption, il est aisé de dériver mathématiquement cette fonction :

$$w = w_s \exp(\varphi \ln(Hr) \exp(aHr)) \Rightarrow \frac{\partial w}{\partial Hr} = w \varphi \exp(aHr) \left(\frac{1}{Hr} + a \ln(Hr) \right) \quad (\text{III.22})$$

Comme déjà évoqué plus haut, avec des coefficients φ et a différents entre adsorption et désorption (hystérésis), le coefficient de capacité hydrique est donc susceptible de varier en fonction du sens d'évolution de l'humidité relative.

1-4-3. Coefficient d'échanges superficiels thermiques et hydriques

Il est communément admis que la résistance superficielle d'un échange convectif est due à la présence d'une couche d'air en écoulement laminaire le long de la paroi. La trajectoire des molécules étant parallèle à la paroi dans cette couche, la chaleur ne peut donc se transmettre que par conduction dans l'air, avec un coefficient de conductivité thermique correspondant au cas de l'air immobile : $\lambda_{air} = 0.025 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$. Les données bibliographiques étant riches pour ce qui concerne l'évaluation du coefficient d'échange thermique convectif $h_{tc} [\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}]$, aussi bien en convection naturelle qu'en convection forcée, il sera donc généralement possible d'évaluer l'épaisseur de la couche laminaire : $e = \frac{\lambda_{air}}{h_{tc}}$

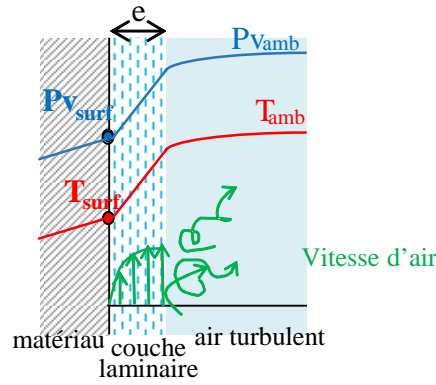


Figure III-5 : Echanges convectifs thermique et hydrique

Considérant, de manière analogue, que le mécanisme de diffusion de la vapeur dans la couche laminaire est identique au cas de l'air immobile, avec une conductivité $\delta_{air}=1.875 \times 10^{-10} \text{ kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$, on peut donc déterminer le coefficient d'échange hydrique superficiel $[s.m^{-1}]$:

$$h_v = \frac{\delta_{air}}{e} = h_{tc} \frac{\delta_{air}}{\lambda_{air}} \quad (\text{III.23})$$

1-4-4. Densités surfaciques de flux thermique et hydrique

Afin de réaliser les bilans thermiques et hydriques des parois et des ambiances, il est nécessaire de calculer, à chaque pas de temps, les densités des flux surfaciques échangés sur les surfaces internes et externes des parois. Le calcul est immédiat, à partir des grandeurs connues sur la surface et dans l'ambiance :

$$\varphi_t = h_t (T_{amb} - T_{surf}) \quad (\text{III.24})$$

$$\varphi_{wv} = h_v (p_{v,amb} - p_{v,surf}) \quad (\text{III.25})$$

1-4-5. Rayonnement solaire

Lorsque l'élément modélisé est en contact avec l'extérieur, ce qui est le cas d'une paroi externe de bâtiment, ou d'une partie de structure d'ouvrage d'art, il est impératif de tenir compte de l'impact du rayonnement solaire incident. Le flux solaire global G (W/m^2) reçu par un élément de surface d'inclinaison et d'orientation quelconque a trois composantes qui sont la radiation en provenance directe du disque solaire, la radiation diffusée par l'atmosphère, et la radiation réfléchiée par le sol environnant. Il est donné par la relation suivante :

$$G = \varphi_{dim} \cos \theta + \varphi_{dih} \frac{1 + \cos \beta}{2} + G_h \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (\text{III.26})$$

Dans cette expression :

- φ_{dim} : densité du flux direct normal. C'est le flux venant directement du disque solaire, incident sur une surface de 1m², perpendiculaire aux rayons ;
- φ_{dih} : densité du flux diffus horizontal. C'est le flux incident sur une surface horizontale, provenant de toutes les parties du ciel (hors disque solaire). Il est supposé isotrope ;
- G_h : flux global horizontal. C'est le flux global (direct + diffus) incident sur une surface horizontale ;
- θ : angle entre le rayon direct et la normale à la surface réceptrice ;
- β : inclinaison de la paroi (0° = horizontale) ;
- ρ : coefficient de réflexion du sol (albédo).

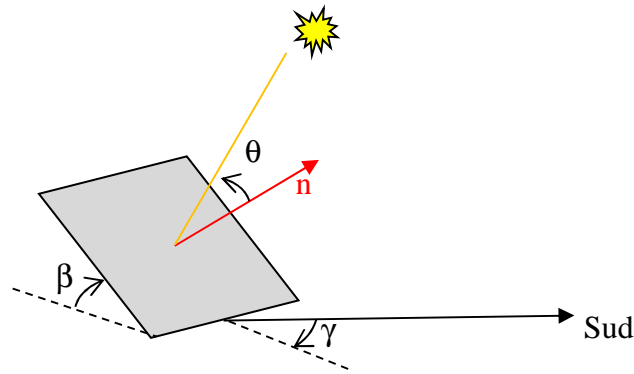


Figure III-6 : Flux solaire reçu par une surface inclinée

L'angle θ est donné par la relation :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega \end{aligned} \quad (\text{III.27})$$

Avec la définition des angles suivants :

- Déclinaison : $\delta = 23.45 \sin \left(360 \times \frac{284 + n}{365} \right)$ n = numéro du jour de l'année (de 1 à 365)
- ϕ : latitude
- γ : azimut de la paroi γ (sud=0°, ouest = 90°, est = -90°, nord = 180°)

- Angle horaire : $\omega = 15(h_s - 12)$ h_s = heure solaire

Dans l'application de ces formules, il convient d'effectuer des tests afin d'éviter des calculs aberrants :

- Vérifier que le soleil est levé. Dans le cas contraire, le flux solaire global G doit être mis à zéro. En posant simplement $\beta = 0$, le critère pour savoir si le soleil est levé est :

$$\cos \theta = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega > 0 \quad (\text{III.28})$$

- Eviter des flux directs négatifs, lorsque le soleil passe derrière la surface considérée : lorsque $\cos \theta < 0$, poser que le flux direct est nul.

La densité du flux solaire absorbé à introduire dans l'équation d'équilibre de surface externe est :

$$\varphi_{abs} = \alpha G \quad (\text{III.29})$$

où α désigne le coefficient d'absorption du matériau vis-à-vis du rayonnement solaire (Courtes Longueurs d'Onde CLO)

2. Implantation du modèle dans l'environnement aux Eléments Finis Cast3M

L'option choisie a été d'implanter cette modélisation en 3D. Ceci laisse un maximum de généralités et permet d'étudier à la fois des échantillons ou structures de forme quelconque, des problèmes 2D tels que des ponts thermiques linéiques ou encore des profils 1D dans des parois planes. Cast3m, (2014) a été choisi comme plateforme de développement éléments finis pour sa facilité d'introduire ces propres modèles tout en bénéficiant de l'architecture de pré et post processeur.

2-1. Traitement des équations de transferts

Les modalités d'implantation des équations dans Cast3M sont présentées, en précisant à l'attention des lecteurs connaissant ce logiciel quelques-uns des opérateurs utilisés, notamment pour le calcul des termes qui ne font pas partie d'une résolution d'un problème de diffusion standard. La stratégie adoptée consiste à présenter chacune des équations couplées sous la forme d'une équation de diffusion thermique standard, directement traitable par Cast3M. Mais ceci nécessite au préalable un calcul de propriétés matériau équivalentes (conductivités thermiques, chaleurs spécifiques, coefficients d'échange superficiel), de conditions aux limites équivalentes, et de termes sources surfaciques ou volumiques équivalents.

2-1-1. Equation de bilan thermique

Cette équation, analogue à l'équation (I.16) en 1D, s'écrit dans le cas général 2D ou 3D :

$$(\rho C)^* \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\lambda \vec{\nabla} T) + Q_t \quad (\text{III.30})$$

Q_t désigne un terme source, dont l'expression est :

$$Q_t = H_s \cdot \vec{\nabla} \cdot (\delta \vec{\nabla} (Hr \cdot p_{vs})) \quad (\text{III.31})$$

Sa construction fait deux fois appel à l'opérateur GRAD de Cast3M, avant l'application du produit scalaire. Q_t est ensuite assimilé à une source volumique de chaleur par l'opérateur SOUR, puis ajouté au chargement thermique par l'opérateur CHAR.

2-1-2. Equation de bilan hydrique

De la même manière, l'équation (I.19) en 1D s'écrit sous sa forme générale 2D ou 3D :

$$\rho_s \left(\frac{\partial w}{\partial Hr} \right) \frac{\partial Hr}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\delta p_{vs} \vec{\nabla} Hr) + \vec{\nabla} \cdot (\delta Hr \vec{\nabla} p_{vs}) = \vec{\nabla} \cdot (\delta p_{vs} \vec{\nabla} Hr) + Q_H \quad (\text{III.32})$$

On retrouve la forme classique de l'équation de la diffusion, qui pourra être programmée sous Cast3M par analogie avec la diffusion thermique, en remplaçant T par Hr , et avec les propriétés suivantes, dont on précise les mots clé dans Cast3M :

- ρ_s correspond à la masse volumique (mot clé 'RHO' de l'opérateur MATE)
- $\xi = \frac{\partial w}{\partial Hr}$ correspond à la chaleur spécifique Cp (mot clé 'C' de l'opérateur MATE)
- $\delta \cdot p_{vs}$ correspond à la conductivité thermique λ (mot clé 'K' de l'opérateur MATE)
- Q_H désigne un terme source, dont l'expression est :

$$Q_H = \vec{\nabla} \cdot (\delta Hr \vec{\nabla} p_{vs}) \quad (\text{III.33})$$

et qui est traité de manière analogue au terme source de l'équation thermique.

2-1-3. Equations d'échanges superficiels

L'équation thermique est la suivante :

$$\lambda \vec{\nabla} (T)_0 \cdot \vec{n} = h_t (T_a - T_0) + \phi_{abs} \quad (\text{III.34})$$

où \vec{n} désigne la normale sortante ; l'indice 0 représente les grandeurs relatives à la surface du matériau ; l'indice a celles relatives à l'ambiance et ϕ_{abs} densité de flux thermique surfacique d'origine extérieure absorbé par la surface. Elle se traite classiquement dans Cast3M, avec un modèle de type convection (mot clé 'CONVECTION' dans l'opérateur MODE) et la prise en compte du coefficient d'échange superficiel h_t par le mot clé 'H' de l'opérateur MATE. La densité du flux surfacique ϕ_{abs} est un chargement introduit par le mot clé 'Q' de l'opérateur CHAR.

L'équation hydrique est la suivante :

$$\begin{aligned} \delta \vec{\nabla} (Hr p_{vs})_0 \vec{n} &= \left(\delta p_{vs} \vec{\nabla} Hr \right)_0 \vec{n} + \left(\delta Hr \vec{\nabla} p_{vs} \right)_0 \vec{n} \\ &= h_v (p_{va} - p_{v0}) = h_v (p_{vsa} Hr_a - p_{vs0} Hr_0) = h_v p_{vs0} \left(\frac{p_{vsa}}{p_{vs0}} Hr_a - Hr_0 \right) \end{aligned} \quad (III.35)$$

L'équation s'écrit donc :

$$\left(\delta p_{vs} \vec{\nabla} Hr \right)_0 \vec{n} = h_{eq} (Hr_{eq} - Hr_0) + \phi_{s0} \quad (III.36)$$

avec les expressions suivantes :

$$Hr_{eq} = \frac{p_{vsa}}{p_{vs0}} Hr_a \quad (III.37)$$

$$h_{eq} = h_v p_{vs0} \quad (III.38)$$

Le terme ϕ_{s0} peut être assimilé à une densité surfacique de flux appliquée sur la surface du matériau, et introduite en tant que chargement par le mot clé 'Q' de l'opérateur CHAR :

$$\phi_{s0} = -\delta Hr \vec{\nabla} p_{vs} \vec{n} \quad (III.39)$$

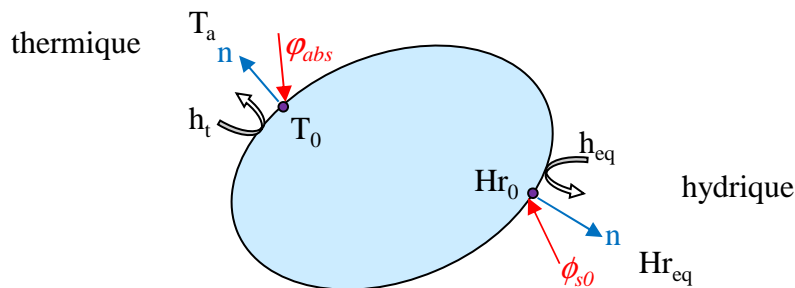


Figure III-7 : Echange superficiel

2-2. Algorithme pour le traitement du couplage

Le traitement des équations couplées a nécessité des développements spécifiques dans l'environnement aux Eléments Finis Cast3M. Il s'agit d'une adaptation de la méthode implicite de thermique transitoire (Theta-méthode) aux deux modes de transferts, thermique et hydrique. La procédure « PASAPAS » habituellement utilisée en diffusion transitoire a été remplacée par des appels répétés à une procédure de résolution spécifique s'inspirant de la procédure TRANSLIN existante. L'algorithme consiste, à l'intérieur de chaque pas de temps, à faire appel alternativement à deux résolutions : une thermique, puis une hydrique. Après chaque résolution, les propriétés des matériaux, la pression de vapeur saturante, et les termes source sont réactualisés, et ces couples de résolutions thermique/hydrique s'enchaînent jusqu'à convergence des résultats. Après quoi le calcul au pas de temps suivant peut s'enchaîner. L'organigramme présenté à la figure III-4 reste valable pour le traitement en EF.

3. Prise en compte de l'hystérésis et des isothermes partielles

Il est apparu que la capacité hydrique ξ pouvait avoir une influence importante sur la cinétique des transferts. Dès lors, il est primordial de prendre en compte les phénomènes d'hystérésis et d'isothermes partielles pour prédire de façon réaliste la dynamique des transferts d'humidité.

Pour mettre en œuvre les isothermes partielles en DF, chaque point i discrétisé est caractérisé par son humidité relative HR_i^t d'une part, mais aussi par sa teneur en eau w_i^t . Au terme de chaque pas de temps, la nouvelle valeur $w_i^{t+\tau}$ est calculée à partir de la capacité hydrique locale :

$$w_i^{t+\tau} = w_i^t + \xi_i(HR_i^{t+\tau} - HR_i^t) \quad (\text{III.40})$$

Le sens d'évolution de HR en chaque point entre l'instant t et l'instant $t+\tau$ permet de savoir si ce point sera en adsorption ou en désorption au pas suivant. La capacité hydrique est alors calculée suivant le principe des équations I.4 ou I.5. La trajectoire de chaque point est ainsi tracée à l'intérieur du cycle enveloppe. Les pas de temps τ ordinairement choisis sont en pratique suffisamment petits pour que les segments discrets imposés par les variations $HR_i^{t+\tau} - HR_i^t$ n'aient pas d'impact sur la trajectoire. Il convient de vérifier qu'au terme d'un incrément, le nouveau point (HR, w) ne sorte pas de l'enveloppe, auquel celui-ci est ramené sur la courbe enveloppe d'adsorption ou de désorption qu'il vient de franchir.

Ce schéma est transposable en EF, où les opérations portent directement sur les champs. La capacité hydrique prend la forme d'un champ par éléments (MCHAML), calculé à partir des champs par points (CHPO) de Hr , de w et du sens d'évolution (adsorption ou désorption). Ce dernier est défini par un champ booléen créé au moyen de l'opérateur MASQ.

4. Mise en œuvre du modèle numérique à l'échelle de l'enveloppe

Les modèles présentés jusqu'ici permettent de calculer les évolutions hygrothermiques dans un domaine de matériau soumis à des évolutions de conditions aux limites connues sur l'ensemble de la frontière du domaine. Pour l'étude du comportement d'une enveloppe de bâtiment, les conditions internes deviennent inconnues, et des équations supplémentaires qui correspondent au bilan hygrothermique de l'air intérieur doivent être ajoutées. L'étude est limitée à des problèmes uni-zones, pour lesquels les champs de température et d'hygrométrie internes sont uniformes.

4-1. Bilan de l'air intérieur de la zone

4-1-1. Bilan thermique

L'ambiance interne est considérée comme un corps de température T_{int} uniforme. Sa capacité thermique est celle de l'air intérieur. Bien qu'il n'en soit pas fait usage dans le cadre de cette thèse, les apports solaires par les vitrages sont pris en compte dès la conception du modèle, ainsi que les déperditions ou apports par transmission à travers les parois vitrées. Par contre, la capacité du stockage thermique des vitrages ou portes isolantes est négligée. Le bilan thermique de l'air intérieur s'exprime en termes de chaleur sensible, faisant varier la température de l'air intérieur. Il s'écrit mathématiquement de la manière suivante :

$$V_{int} \rho_{air} C_{pair} \frac{\partial T_{int}}{\partial t} = \sum_{parois} A_i \phi_{tinti} + \sum_{vitrages} A_j U_{wj} (T_{ext} - T_{int}) + P_{ch} - P_{fr} + P_{chconv} \quad (III.41)$$

avec les notations:

- A_i, A_j : surfaces des parois [m^2]
- U_{wj} : coefficients de transmission thermique des parois vitrées [$W.m^{-2}.K^{-1}$]
- ϕ_{tinti} : Densité du flux surfacique échangé entre la surface intérieure de la paroi i et l'ambiance, calculée par la formule III.24 [$W.m^{-2}$]

- P_{ch} P_{fr} : puissances délivrées par les systèmes de chauffage et de refroidissement [W]
- P_{chconv} : partie convective des charges internes [W]

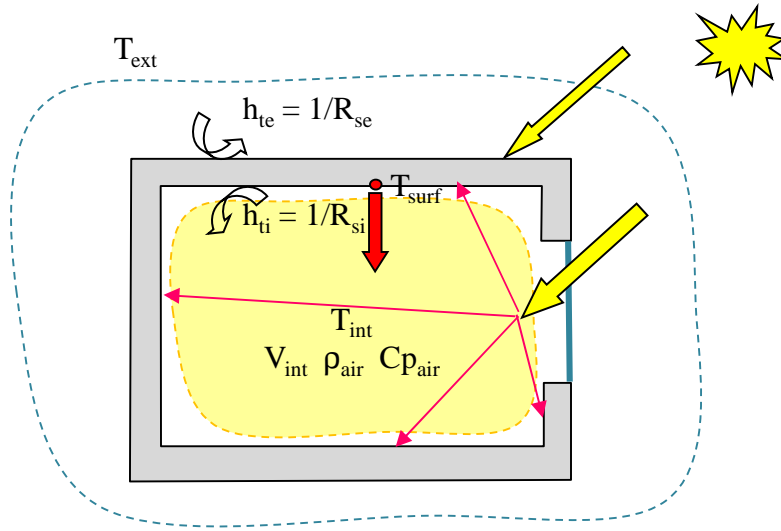


Figure III-8 : Bilan thermique de l'ambiance intérieure

Le rayonnement Courte Longueur d'Onde pénétrant dans l'enceinte par les vitrages est estimé à partir du rayonnement incident sur chaque vitrage, pondéré par le facteur solaire de celui-ci. Le rayonnement total pénétrant est redistribué de manière homogène sur l'ensemble des parois internes de l'enveloppe, et intervient au niveau de l'équation du bilan de la surface interne de chaque paroi. Il en va de même de la part radiative des charges internes. Le coefficient d'absorption des surfaces internes est pris égal à 1. Les échanges radiatifs mutuels entre parois internes sont simplifiés à l'extrême, en considérant que chaque paroi vue est à la température ambiante intérieure, ce qui n'est pas très éloigné de la réalité, à condition que les différentes parois du local présentent un niveau d'isolation sensiblement homogène. Les coefficients d'échanges superficiels h_t globalisent les échanges par rayonnement et par convection.

Dans le schéma implicite, l'équation de bilan thermique s'écrit sous sa forme discrétisée :

$$T_{int}^{t+\tau} = T_{int}^t + \frac{\tau}{V_{int} \rho_{air} C_{p\ air}} \left[\sum_{parois} A_i \phi_{t\ int\ i}^{t+\tau} + \sum_{vitrages} A_j U_{wj} (T_{ext}^{t+\tau} - T_{int}^{t+\tau}) + P_{ch}^{t+\tau} - P_{fr}^{t+\tau} + P_{ch\ conv}^{t+\tau} \right] \quad (III.42)$$

4-1-2. Bilan hydrique

Il s'exprime en termes de flux massiques d'humidité, faisant varier l'humidité spécifique de la zone, supposée uniforme.

$$V_{\text{int}} \rho_{\text{air sec}} \frac{\partial x_{\text{int}}}{\partial t} = \sum_{\text{parois}} A_i \phi_{\text{wv int}_i} + Q_{mv} \quad (\text{III.43})$$

Dans l'équation du bilan hydrique :

- x_{int} désigne l'humidité spécifique de l'air intérieur [kg(eau)/kg(air sec)],
- $\phi_{\text{wv int}_i}$ est la densité du flux massique surfacique échangé sur la face interne de la paroi n°i, calculé suivant la formule III.25.
- Q_{mv} est le bilan des débits massiques d'eau assurés par les charges internes, les équipements d'humidification et de déshumidification

Au terme d'un pas de calcul, on connaît donc la température et l'humidité spécifique de l'air intérieur. Il est nécessaire de recalculer l'humidité relative : $H_{r \text{ int}} = P_{v \text{ int}} / P_{vs \text{ int}}$ où la pression de vapeur est donnée en fonction de l'humidité spécifique par la relation suivante :

$$P_{v \text{ int}} = \frac{101325 x_{\text{int}}}{0.622 + x_{\text{int}}} \quad (\text{III.44})$$

Dans le schéma implicite, l'équation de bilan hydrique s'écrit sous sa forme discrétisée :

$$x_{\text{int}}^{t+\tau} = x_{\text{int}}^t + \frac{\tau}{V_{\text{int}} \rho_{\text{air sec}}} \left[\sum_{\text{parois}} A_i \phi_{\text{wv int}_i}^{t+\tau} + Q_{mv \text{ hum}}^{t+\tau} - Q_{mv \text{ deshu}}^{t+\tau} + Q_{mv \text{ ch}}^{t+\tau} \right]$$

4-2. Traitement spécifique des inconnues de zone

L'approche implicite envisagée, si elle est souhaitable pour préserver la convergence, présente néanmoins une difficulté. En différences finies, chaque équation de bilan de zone fait intervenir à la fois les inconnues (T ou Hr) de l'air et aussi celles des surfaces internes des différentes parois de la zone. Après assemblage des matrices des différentes parois, une telle équation fait perdre le caractère tri-diagonal de la matrice du système à résoudre, ce qui pénalise considérablement le temps de résolution, puisque l'algorithme de Thomas ne peut plus être utilisé. Il en va de même en EF, où il n'a pas trouvé de solution pour mettre en œuvre une telle équation avec les opérateurs classiques de Cast3M.

Il est donc opté pour une méthode consistant à réactualiser les conditions internes $T_{\text{int}}^{t+\tau}$ et $Hr_{\text{int}}^{t+\tau}$, non pas après chaque pas de temps τ ce qui serait équivalent à un traitement explicite, mais à l'intérieur de la boucle de convergence (voir Figure III-4). Ainsi, cette méthode hybride permet de préserver la convergence, tout en évitant d'alourdir la résolution des systèmes linéaires. En revanche, elle peut conduire à une augmentation du nombre d'itérations avant convergence. Cette méthode est applicable aussi bien aux DF qu'aux EF.

Il est à noter que le volant hygrothermique de la masse d'air interne à la zone est beaucoup plus faible que celui des parois, ce qui contraint à l'utilisation de pas de calcul assez petits. Des algorithmes à deux pas de temps τ seraient à imaginer dans des développements futurs (τ_1 long pour les transferts dans les matériaux, τ_2 court pour les bilans de zone).

4-3. Mise en œuvre pratique

Un modèle de zone en DF nécessite la définition des compositions des parois types, et un tableau de métré donnant, pour chaque paroi de l'enveloppe, sa surface, son azimuth, son inclinaison et son coefficient d'absorption vis-à-vis du rayonnement solaire, Figure III-9.

Le modèle EF, conçu également pour l'étude de pièces d'ouvrages en ambiance extérieure, calcule directement le flux solaire incident à partir de la géométrie du maillage. Un modèle géométrique de l'enveloppe en 3D est donc possible, sans qu'il soit nécessaire de définir l'orientation des faces externes. Toutefois, dans le but de limiter le nombre d'inconnues, et donc de réduire le temps de calcul, il est préféré de définir chaque paroi comme un prisme 1D de section unitaire, qui sera orienté convenablement par rotation, et auquel il est affecté un coefficient multiplicateur pour tenir compte de l'aire réelle de la paroi (Figure III-10).

| N° | Libellé paroi type | N° paroi type | Surface nette (m²) | Inclinaison (°) (0° = horizontal) | Angle/Sud (°) (Ouest = +90°) | Alpha = coeff. absorpt. CLO | Surface vitrage (m²) | Uw (W/m²K) | Facteur solaire |
|---------------------|--------------------|---------------|--------------------|-----------------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|------------|-----------------|
| 1 | mur BB 38cm | 1 | 7.87 | 90 | 0 | 0.6 | | | |
| 2 | mur BB 38cm | 1 | 7.02 | 90 | 90 | 0.6 | 1.66 | 0.36 | 0 |
| 3 | mur BB 38cm | 1 | 8.68 | 90 | -90 | 0.6 | | | |
| 4 | mur BB 38cm | 1 | 7.87 | 90 | 180 | 0.6 | | | |
| 5 | toiture BB | 2 | 5.19 | 18.26 | 0 | 0.6 | | | |
| 6 | toiture BB | 2 | 5.19 | 18.26 | 180 | 0 | | | |
| 7 | plancher | 3 | 9.85 | 180 | | | | | |
| 8 | | | | | | | | | |
| 9 | | | | | | | | | |
| 10 | | | | | | | | | |
| Volume cellule (m3) | | 27.25 | | | | | | | |

DF : tableau des parois

Figure III-9 : Mode de saisie de la géométrie d'enveloppe en différences finies

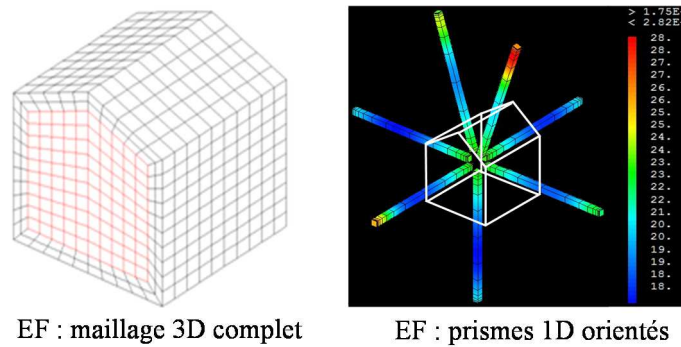


Figure III-10 : Modes de saisie de la géométrie d'enveloppe en éléments finis

5. Identification de paramètres par la méthode du simplexe

Cette étude a dû faire appel, à plusieurs reprises, à des calages de paramètres (propriétés de matériaux, coefficients d'échange...) à partir de résultats expérimentaux. En marge des modèles de transferts développés, il a donc été nécessaire de mettre au point un outil d'optimisation qui soit compatible avec ces modèles. Il s'agit d'identifier le jeu de paramètres qui minimise une fonction, qui peut être l'écart moyen entre les résultats expérimentaux et ceux du modèle, au sens des moindres carrés.

La méthode de minimisation du Simplexe a été introduite par Nelder et Mead en 1965 et permet de déterminer le minimum d'une fonction sans calculer sa dérivée. Elle résout directement le problème en utilisant la valeur de la fonction. Dans le cas où il y a peu de paramètres, elle est appréciée pour sa robustesse, sa simplicité de programmation et son faible temps de calcul. Pour un problème à n paramètres à identifier il s'agit de construire une figure géométrique à n dimensions qui est le volume d'une enveloppe convexe de $n+1$ sommets. Chaque sommet correspond à une valeur de la fonction. Les sommets de ce polygone (simplexe) subiront des transformations géométriques vers un minimum global.

Les itérations de l'algorithme du Simplexe correspondent à de simples opérations algébriques de transformations géométriques élémentaires sur les sommets du polygone (réflexion, expansion, rétrécissement et contraction). Chaque itération de la transformation dépend uniquement d'une série de comparaisons entre les valeurs de la fonction correspondant aux sommets du polygone pour remplacer le sommet pour lequel la fonction est maximum par le nouveau point fixe. Ainsi, le polygone est réfléchi, étendu, réduit jusqu'à son optimum.

En pratique, l'algorithme du simplexe a été initialement implanté en VBA sous Excel au GEMH par Nguyen (2014), puis en Gibiane dans Cast3M pour les besoins de cette thèse.

Conclusion

Deux approches différentes ont été abordées pour l'établissement des modèles. La première en différences finies sous VBA, la deuxième en éléments finis sous Cast3M. Cette stratégie a été fructueuse, puisqu'elle nous a permis de détecter, à plusieurs reprises, des erreurs de programmation dans l'une ou l'autre des méthodes, lorsque les résultats sur des exemples test ne coïncidaient pas. Sur l'ensemble des exemples testés, les deux modèles donnent actuellement des résultats rigoureusement identiques, dès lors que les pas temporels et spatiaux de discrétisation choisis (en EF comme en DF) sont suffisamment fins pour que les résultats soient invariants en fonction de ces pas.

Les modèles établis désormais constituent un ensemble suffisamment général pour pouvoir mener à bien des modélisations, quelle que soit l'échelle d'étude. Ils seront largement utilisés dans les chapitres suivants, aussi bien pour identifier des paramètres que pour soutenir l'analyse des résultats expérimentaux afin de mieux comprendre les phénomènes hygrothermiques. Le schéma de la Figure III-11 résume la démarche retenue pour le développement et l'application des modèles dans ce qui suit.

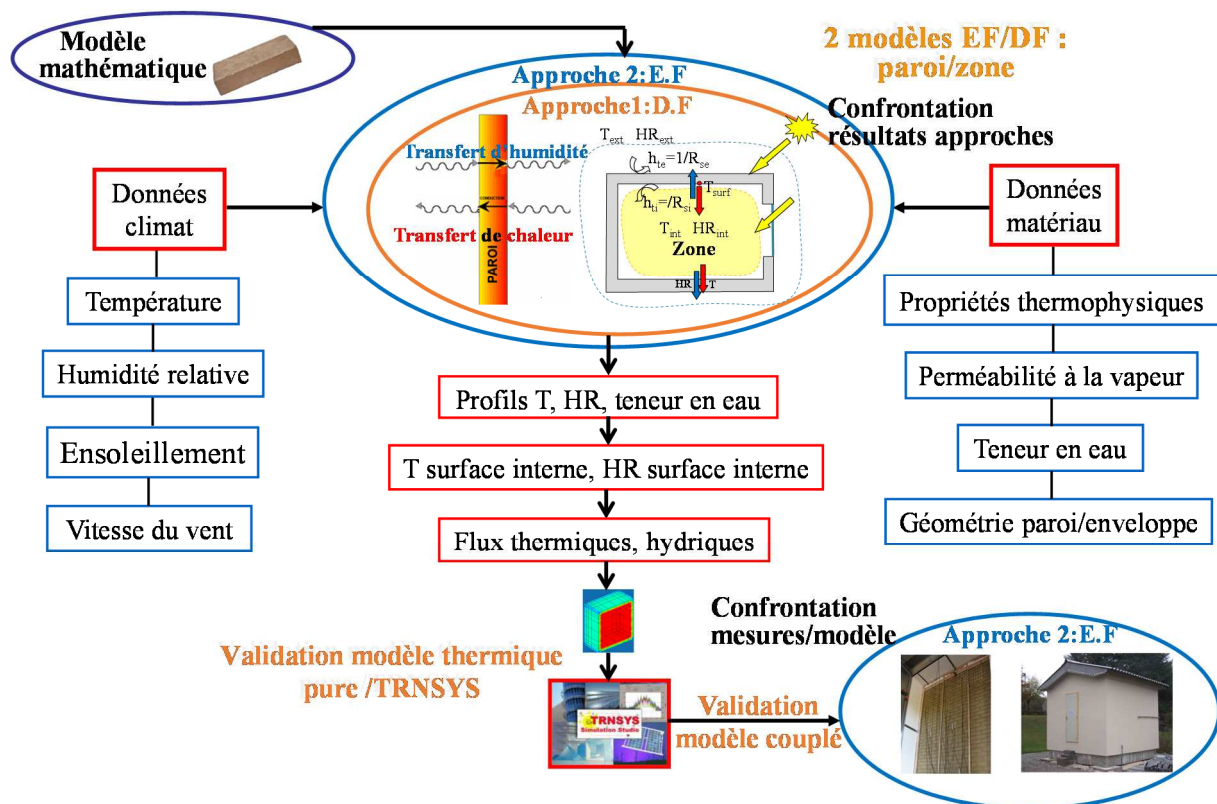


Figure III-11 : Schéma de la démarche adoptée dans la modélisation

Chapitre IV

Caractérisation thermo hydrique à l'échelle du matériau

*« La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de
l'information. »*

Albert Einstein

Introduction

Ce chapitre présente l'ensemble des caractérisations expérimentales réalisées à l'échelle du matériau. Les propriétés liées au transfert de chaleur et de masse sont définies dans le but d'alimenter, à terme, les modèles proposés. Les résultats de mesure de conductivité thermique, de capacité calorifique, de diffusion hydrique mais également d'isothermes de sorption sont présentés. Les propriétés de réserve hydrique « MBV » sont aussi évoquées.

1. Caractérisation des propriétés de transfert de masse

1-1. Protocole expérimental

1-1-1. Préparation des échantillons

Quatre matériaux hygroscopiques ont fait l'objet de caractérisation dissociée thermique et hydrique à cette échelle : le béton de bois, la terre comprimée, le travertin et la plaque de plâtre. Le béton de bois provient de la cellule-test en béton de bois ; la terre comprimée qui a servi à la construction du mur de terre étudié au niveau de l'enceinte bi-climatique ; le travertin prélevé du mur de cave de la maison en pierre ; la plaque de plâtre qu'on trouve sur le marché, la même que celle utilisée dans la maison préfabriquée.

Les échantillons du béton de bois de forme cylindrique, ont été prélevés par carottage et tronçonnage dans le seuil de la cellule-test, Figure IV-1. Afin d'isoler les effets d'échelle et de séparer les échanges surfaciques de la diffusion massique, trois dimensions types ont été définies, Figure IV-2:

- 4 petits ($\phi \times h = 42 \times 38$ mm) ;
- 4 moyens ($\phi \times h = 91 \times 18$ mm) ;
- 5 gros ($\phi \times h = 91 \times 42$ mm).



Figure IV-1 : Carottage et découpage des éprouvettes du béton de bois

Concernant la terre crue, trois demi-briques de dimensions ($l \times h \times L = 107 \times 57 \times 107$ mm) ont été choisies pour le tracé de la cinétique de sorption. En complément, une brique entière a été instrumentée, à cœur, d'un thermo hygromètre capacitif (AHLBORN) pour les mesures respectives de la température et de l'humidité relative. Deux thermocouples (type T) permettent également de mesurer les températures de surface, Figure IV-2.

Au cas de la pierre, 02 échantillons d'un moellon de travertin découpé en deux, en forme irrégulière, ont été étudiés. Pour la plaque de plâtre, 03 spécimens de dimensions ($l \times h \times L = 100 \times 12,5 \times 100$ mm) ont été pris, Figure IV-2.



Figure IV-2 : Eprouvettes des matériaux béton de bois, terre crue, travertin et plaque de plâtre

1-1-2. Evolution de la teneur en eau moyenne selon la méthode gravimétrique

Les propriétés de diffusion hydrique reposent essentiellement sur les essais d'adsorption et de désorption employant la méthode gravimétrique. Celle-ci est basée sur la pesée régulière des échantillons placés dans une enceinte climatique, programmée pour imposer différents paliers d'humidité relative durant des phases d'adsorption et de désorption. L'ensemble des caractérisations est réalisé à une température constante de 20°C. Afin d'obtenir des isothermes de sorption complète, il a été opté pour le chemin hydrique suivant :

- L'ensemble de l'échantillonnage est conditionnée dans l'ambiance du laboratoire (+/- 20°C, +/-50%HR),
- Mise en place des échantillons à température constante à 20°C et à 95%HR en phase d'adsorption ;
- Suivi par pesée des échantillons à deux paliers de désorption à 65%HR et 50%HR à 20°C de température constante ;
- Passage des échantillons dans une étuve à 103°C pour un séchage optimal et mesure de la masse sèche M_s ;
- Suivi des échantillons durant trois paliers d'adsorption à 50%HR, 65%HR et 80%HR à une température constante de 20°C.

Le suivi de la cinématique de prise en humidité des matériaux a été assuré par une enceinte climatique « Sapratin 120 H 20/1 SP ». Les mesures des pertes de masse pour la désorption et le gain de masse pour l'adsorption ont été menées par une balance électronique (KERN) de précision $\pm 0,01$ g et de 2500 g de capacité, Figure IV-3.



Figure IV-3 : Enceinte climatique et pesée des échantillons

La stabilisation de chaque palier d'humidité a mis plus de 15 jours à trois mois selon le type du matériau. Des pesées régulières des différents échantillons dans chaque phase ont permis de noter la vitesse de prise ou de perte de masse de chaque matériau. Les mesures des pertes de masse pour la désorption et le gain de masse pour l'adsorption ont été menées par une balance électronique (KERN) de précision $\pm 0,01$ g et de 2500 g de capacité. Après avoir mesuré la masse sèche M_s , après passage à l'étuve, l'évolution de la teneur en eau moyenne \bar{w} se déduit de l'évolution de masse humide M_h selon l'expression suivante :

$$\bar{w} = \frac{M_h - M_s}{M_s} \quad (\text{IV.1})$$

La Figure IV-4 présente les résultats obtenus pour le cas du béton de bois. L'ensemble des résultats expérimentaux sont regroupés dans l'annexe II.

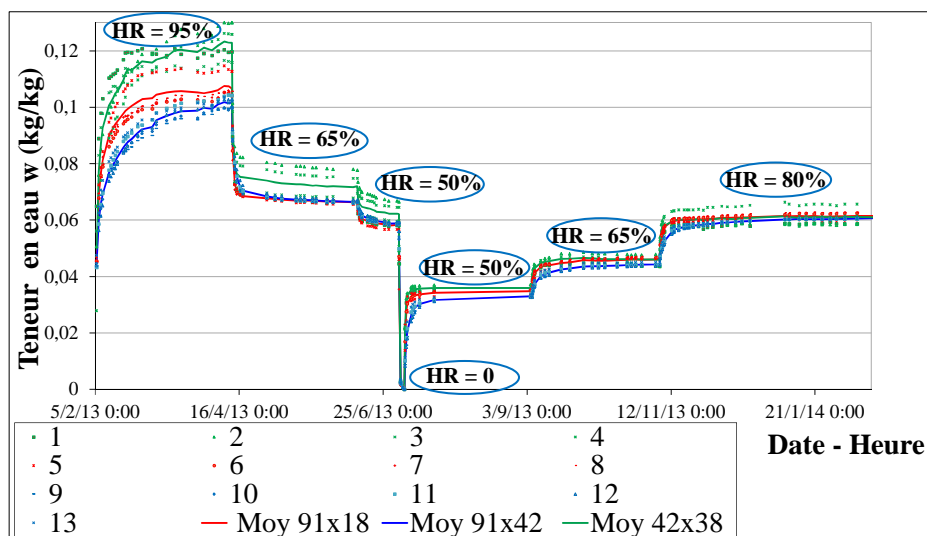


Figure IV-4 : Teneur en eau du matériau béton de bois

1-2. Isothermes de sorption des matériaux

La construction des isothermes de sorption repose sur l'identification du taux d'humidité d'équilibre pour chaque palier d'humidité relative durant les phases de désorption et d'adsorption. Le modèle proposé par Merakeb (2006), basé sur la thermodynamique de l'équilibre de phase de l'eau liée avec sa pression de vapeur saturante est utilisé. La relation déjà explicitée au chapitre I, est donnée en fonction de la teneur en eau et l'humidité relative:

$$w = w_s \exp(\phi \ln(h) \exp(ah)) \quad (IV.2)$$

Dans cette expression apparaissent les trois paramètres de sorption à identifier : w_s , ϕ et a . L'humidité d'équilibre w_s atteinte dans une ambiance saturée (100 % HR) est commune aux courbes d'adsorption et de désorption, alors que les paramètres de calage de la courbure des isothermes ϕ et a doivent être identifiés séparément suivant qu'il s'agit de l'adsorption ou de la désorption. Ces deux derniers jouent un rôle important dans la caractérisation de la capacité hydrique.

Les cinq paramètres de sorption du modèle sont alors optimisés en minimisant, selon la méthode des moindres carrés, l'écart entre le modèle et les mesures expérimentales. La Figure IV-5 met en évidence le résultat de cette optimisation pour deux échantillons du béton de bois. Le Tableau IV-1 regroupe les paramètres des isothermes de sorption pour le béton de bois, la terre crue et le travertin (voir annexe II). Les paramètres pour la plaque de plâtre sont comparés à ceux trouvés dans [Kwiatkowski, 2009]. Les données sont complétées, à titre de comparaison avec d'autres matériaux comme l'épicéa et le douglas, par des propriétés de sorption issues d'essais expérimentaux puisées dans la littérature [Manfoumbi Boussougou, 2012], Figure IV-6.

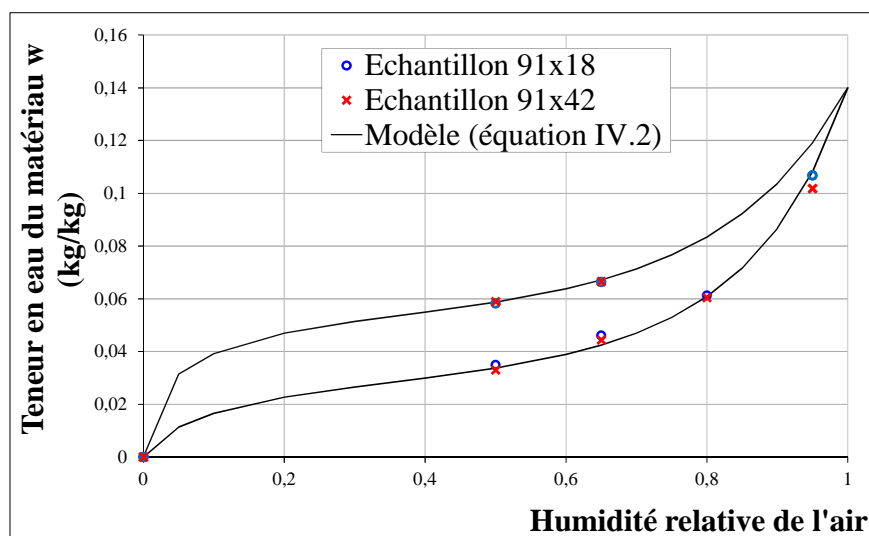
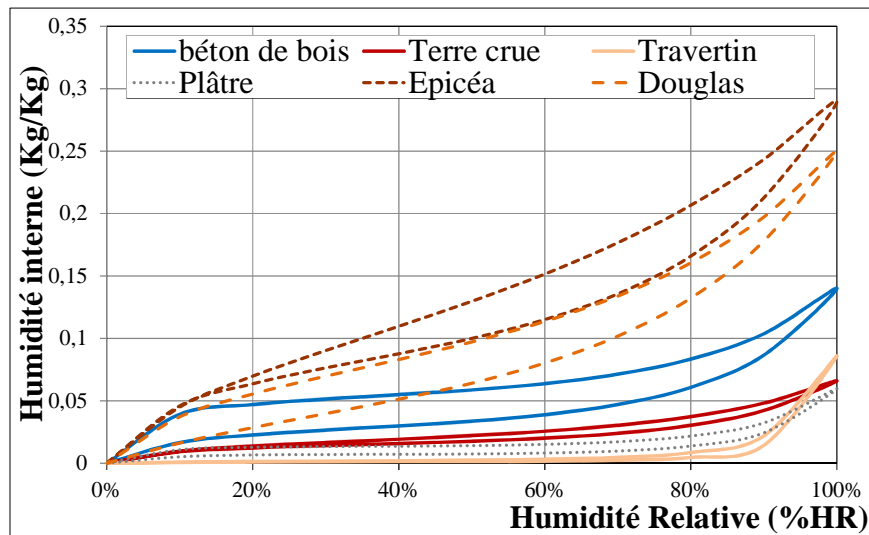


Figure IV-5 : Courbes isothermes identifiées à partir des points de paliers (béton de bois)

Tableau IV-1 : Paramètres d'isothermes de sorption

| Matériau | Adsorption | | Désorption | | w_s |
|-------------------------|------------|------|------------|-------|-------|
| | φ | a | φ | a | |
| Béton de Bois | 0.76 | 1.99 | 0.45 | 2.05 | 0.14 |
| Terre Crue | 0.701 | 2.0 | 0.71 | 1.6 | 0.066 |
| Travertin | 1.61 | 2.62 | 1.63 | 2.305 | 0.086 |
| Plâtre ^(*) | 0.82 | 2.61 | 0.57 | 2.58 | 0.090 |
| Epicéa ^(**) | 0.68 | 1.63 | 0.74 | 0.9 | 0.29 |
| Douglas ^(**) | 1.05 | 1.25 | 0.73 | 1.25 | 0.25 |

^(*)[Kwiatkowski, 2009], ^(**)[Manfoumbi Boussougou, 2012].

*Figure IV-6 : Isothermes de sorption des matériaux*

1-3. Capacité hydrique des matériaux

Du fait que l'isotherme de sorption caractérise la capacité du matériau à stocker l'eau, la pente de cette isotherme ou sa dérivée peut être calculée :

$$\xi = \frac{\partial w}{\partial Hr} \quad (\text{IV.3})$$

En accord avec la forme analytique de l'isotherme de sorption, expression (IV-2), la capacité hydrique s'exprime par :

$$\xi(Hr) = w(Hr) \cdot \varphi \cdot \left[\frac{\exp(a \cdot Hr)}{Hr} + a \cdot \ln(Hr) \cdot \exp(a \cdot Hr) \right] \quad (\text{IV.4})$$

Pour l'ensemble des matériaux étudiés et utilisés par la suite, la Figure IV-7 met en évidence la capacité hydrique lors des processus d'adsorption et de désorption.

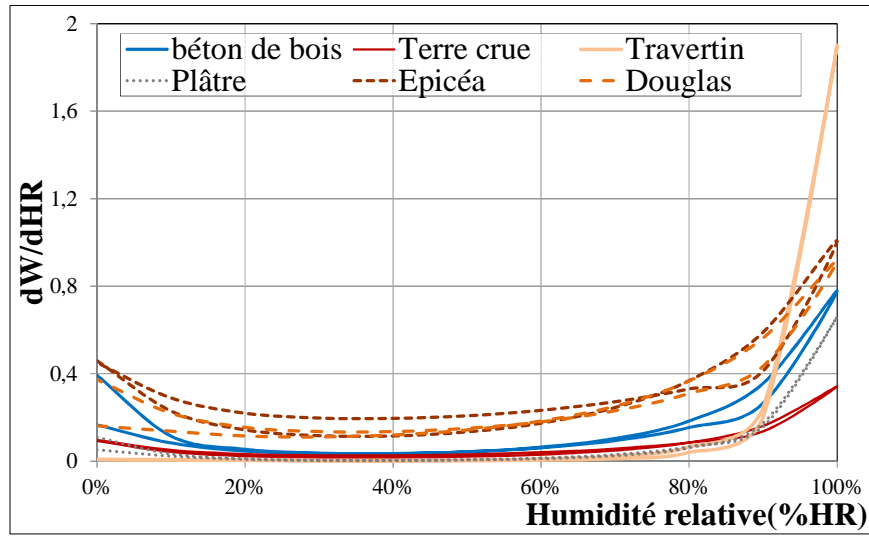


Figure IV-7 : Capacité hydrique des matériaux

1-4. Propriétés de diffusion

Le but premier des essais de sorption est de déterminer les courbes isothermes de sorption, mais ces essais peuvent également être utilisés pour identifier les propriétés de diffusion des matériaux, en exploitant la cinétique des phases transitoires jusqu'à l'obtention des différents paliers. Pour ce faire, les courbes expérimentales de variation de teneur en eau sont intégrées dans une procédure de minimisation des écarts avec le calcul par le modèle établi en EF.

Le transfert de masse repose sur l'implémentation dans Cast3m d'une loi de Fick intégrant un comportement non linéaire. Exprimée en terme d'humidité relative, cette loi est définie par:

$$\left(\rho_s \cdot \frac{\partial w}{\partial HR} \right) \cdot \frac{\partial HR}{\partial t} = \vec{\nabla} \left(\delta(w) \cdot p_{vs} \cdot \vec{\nabla} HR \right) + \vec{\nabla} \left(\delta(w) \cdot HR \cdot \vec{\nabla} p_{vs} \right) \quad (IV.5)$$

La perméabilité à la vapeur δ , qui est supposée dépendante de l'humidité (loi de Fick non linéaire), se met sous la forme :

$$\delta(w) = \delta_o \cdot \exp(k \cdot w) \quad (IV.6)$$

δ_o représente la perméabilité anhydre tandis que k est un paramètre de non linéarité. Il est considéré une isotropie matérielle dans la caractérisation des paramètres. Le protocole de caractérisation demandant la discrétisation des échantillons par EF, seules les caractérisations

sur le béton de bois (échantillons cylindriques) et de terre crue (échantillons cubiques) ont été traités, puisqu'ils ont une géométrie connue, ce qui n'est pas le cas du travertin.

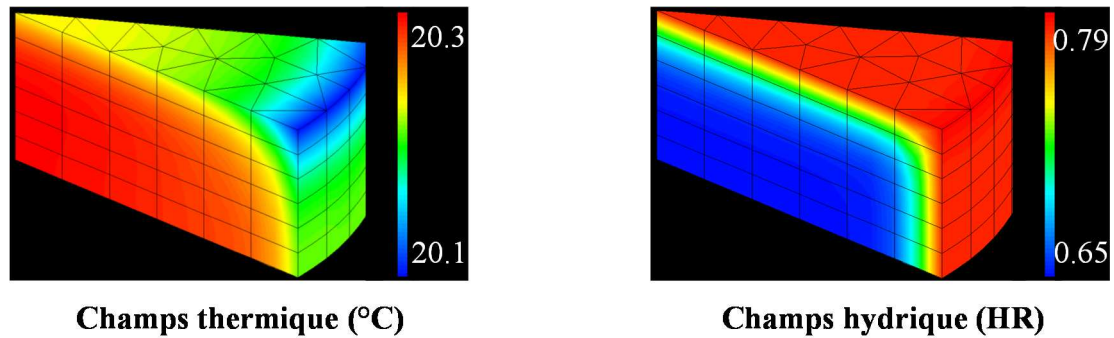


Figure IV-8 : Modélisation des échantillons du béton de bois, maillage et exemples de champs lors d'une adsorption

Pour l'identification des paramètres δ_0 et k , il est fait appel à la méthode du simplexe (méthode inverse), qui a été implantée dans l'environnement aux EF Cast3M. Plutôt qu'une identification globale des paramètres de perméabilité sur l'ensemble de paliers, il a été préféré de les identifier séparément, sur chaque palier individuel de chaque échantillon. Ce choix présente plusieurs avantages. Premièrement, on constate sur la figure IV-5 que les isothermes totales théoriques passent près des points expérimentaux, mais pas exactement sur ceux-ci. C'est un inconvénient lors de l'identification sur les paliers individuels, car l'asymptote numérique de $w=f(t)$ est différente de l'asymptote mesurée. Ceci pénalise la fonction d'écart expérience/modèle par des écarts qui n'ont rien à voir avec la cinétique de sorption proprement dite. Pour chaque palier individuel, il est donc choisi d'identifier les paramètres de sorption localement, sur un nombre réduit de points expérimentaux tel que la courbe de sorption passe exactement par le point du palier considéré. Ce choix semble justifié, car dans la zone du palier, les écarts entre la branche d'isotherme ainsi tracée et l'isotherme moyenne générale restent insignifiants.

Deuxièmement, l'ensemble des perméabilités identifiées va être représenté sous la forme d'un faisceau de segments de courbes sur un graphique de synthèse, ce qui permet d'avoir des informations sur la dispersion des résultats. Le but est de montrer l'indépendance des paramètres de perméabilité en fonction de la taille des échantillons et du sens de sorption (adsorption- ou désorption).

Enfin, l'identification par segments exponentiels courts de la loi $\delta=f(w)$ permet d'éviter tout a priori sur la forme mathématique la mieux adaptée à cette loi. La loi optimale à adopter pour toute l'étendue de teneur en eau pourra être choisie au final à partir du nuage total de segments. Une telle approche suppose que les conditions initiales de chaque calcul de palier soient connues. Elles correspondent à un état d'équilibre supposé atteint au terme du palier précédent. Pour le béton de bois et la terre crue, les figures IV-9 et IV-10 représentent les faisceaux de courbes obtenus pour les différents paliers.

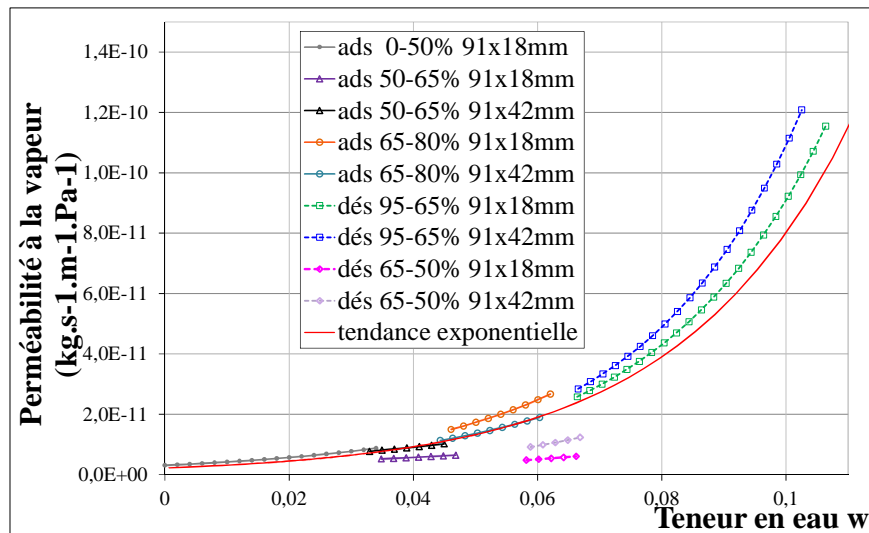


Figure IV-9 : Perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau, cas du béton de bois

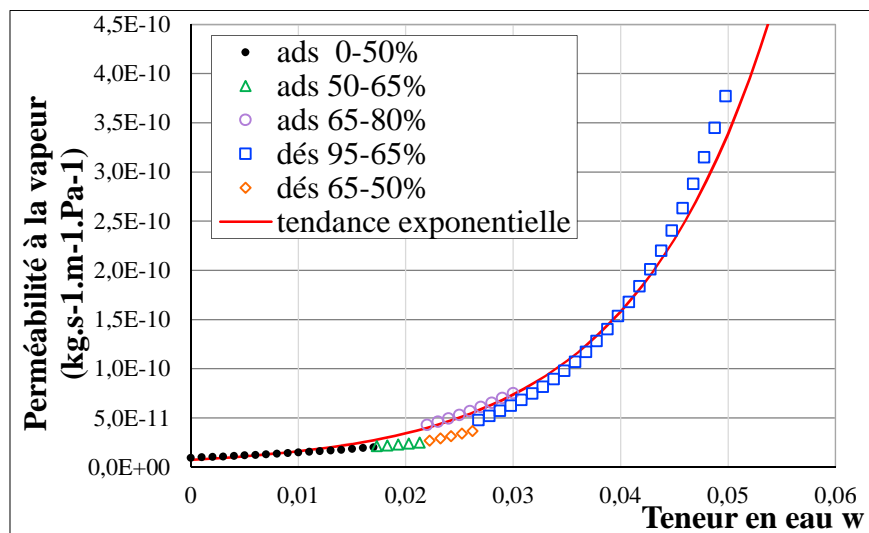


Figure IV-10 : Perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau, cas de la terre crue

Il est mis en évidence un assez bon raccordement des segments (à l'exception du dernier palier de désorption du béton de bois), et une indépendance du sens d'évolution (adsorption ou

désorption). Le choix, au final, est de conserver une loi exponentielle, identifiée sur l'ensemble des points. Les résultats de l'identification sont résumés dans le tableau IV-2.

Tableau IV-2 : Perméabilités non linéaires

| Matériau | Perméabilité anhydre δ_o ($\text{kg.s}^{-1}.\text{m}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$) | k |
|---------------|--|------|
| Béton de Bois | 2.19×10^{-12} | 36 |
| Terre crue | 7.48×10^{-12} | 76.3 |

La Figure IV-11 met en évidence le bon comportement de la caractérisation des propriétés de diffusion pour l'exemple des échantillons de béton de bois ($\phi \times h = 91 \times 42$ mm), sur des paliers d'adsorption suite à l'identification de la perméabilité.

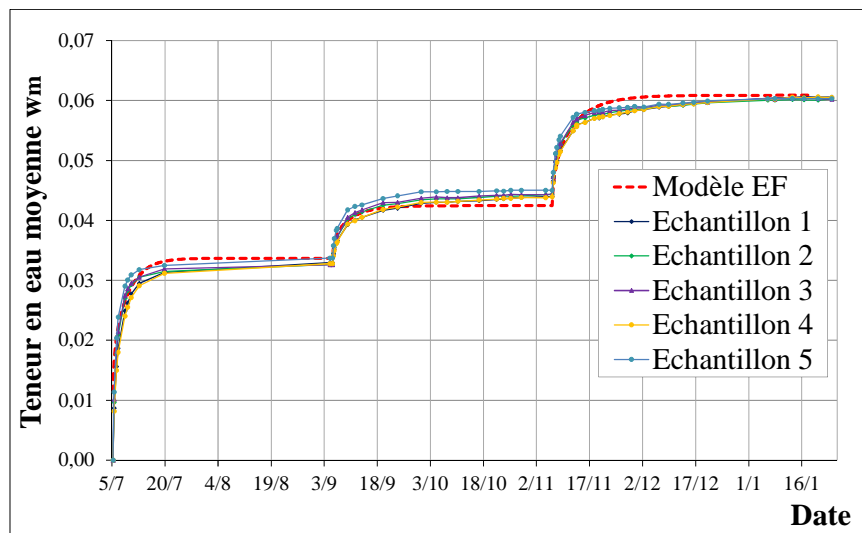


Figure IV-11 : Comparaison entre courbes expérimentales et modèle EF après identification de la perméabilité, cas du béton de bois

Cette méthode d'identification, relativement originale, nous a donc permis d'obtenir une loi continue de variation de la perméabilité à la vapeur en fonction de la teneur en eau. Les tests classiques de perméabilités (méthode de la coupelle) sont moins riches d'informations, puisqu'ils ne conduisent qu'à deux valeurs de perméabilité : l'une sèche sur un intervalle de HR [0, 50%], l'autre humide sur un intervalle [50, 100%].

Une caractérisation en régime dynamique peut notamment résulter d'autres propriétés hydriques du matériau. L'évaluation du pouvoir tampon hydrique ou inertie hydrique, dans ce cas, par la méthode MBV se justifie très pertinente.

1-5. Mesure de la MBV (Moisture Buffer Value)

Un essai de mesure MBV sur les matériaux investigués en régime dynamique unidirectionnel, a été mené selon le protocole du projet Nordest [Rode et al, 2005]. Cette mesure permet de quantifier la capacité des matériaux à stocker en surface l'humidité afin de répondre à des exigences de régulation hydrique des enveloppes. Les échantillons, déjà utilisés pour la mesure des isothermes de sorption et la perméabilité, ont d'abord été étanchéifiés par un parafilm ou par un silicone sur quatre faces (parallélépipèdes) ou sur leur face latérale (cylindres) en ne laissant que deux surfaces planes d'échange pour assurer une diffusion unidirectionnelle. Les échantillons ont ensuite été placés en conditionnement à 50% HR et 23°C jusqu'à stabilisation de leur masse. Enfin, des cycles journaliers d'humidification et de séchage (8 heures à 75%HR et 16 heures à 33%HR) ont été conduits durant une semaine afin d'obtenir des cycles en régime stabilisé, et ce avec une variation relative de masse en adsorption inférieure à 5% sur les trois derniers jours. L'humidité moyenne est mesurée par pesée des échantillons. La capacité de tampon hydrique ($MBV_{pratique}$) a été calculée sur la moyenne des cycles d'adsorption et désorption des trois derniers jours selon la relation suivante :

$$MBV_{pratique} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{S \cdot \Delta HR} \quad (\text{g/m}^2\%RH) \quad (IV.7)$$

M_{\max} , M_{\min} représentent respectivement la masse des échantillons maximale et minimale exprimée en grammes sous humidité maximale (75%HR) et minimale (33 %HR). S désigne la surface exposée, d'une valeur minimale de 0,03 m² ; et ΔHR l'écart d'humidité relative, ici de 42%.

Concernant les résultats obtenus pour le béton de bois, des moyennes de 2,11 et 2,52 (g/m².%HR) sont trouvées aux cas des moyens et gros échantillons du béton de bois (voir tableaux IV-3, IV-4, Figures IV-12, IV-13). Ces valeurs correspondent aux matériaux d'un pouvoir tampon excellent d'après la classification du projet Nordest [Rode et al, 2005].

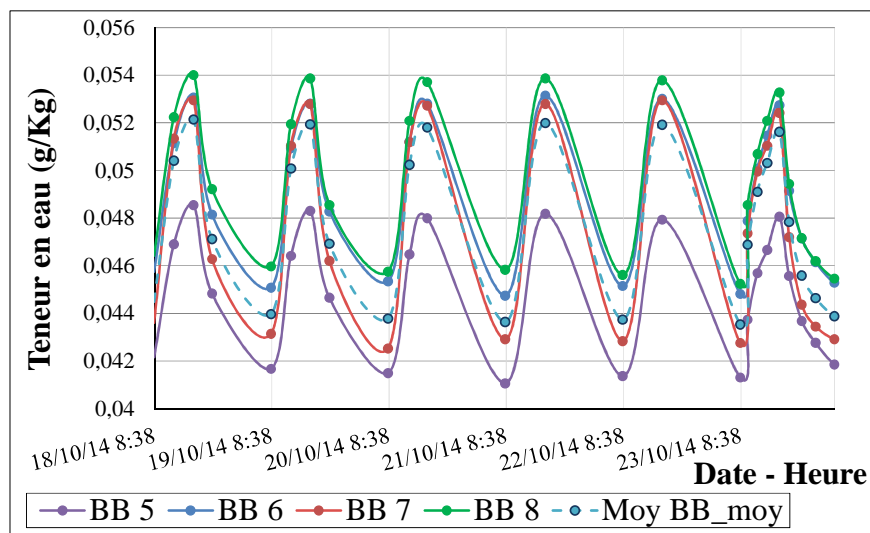
Tableau IV-3 : MBV calculée sur les 3 derniers cycles des échantillons moyens du béton de bois

| Echantillon | BB ₅ | BB ₆ | BB ₇ | BB ₈ | Moyenne | Ecart type |
|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------|------------|
| MBV | 1,96 | 2,14 | 2,36 | 1,98 | 2,11 | 0,15 |

Tableau IV-4 : MBV calculée sur les 3 derniers cycles des gros échantillons du béton de bois

| Echantillon | BB ₉ | BB ₁₀ | BB ₁₁ | BB ₁₂ | BB ₁₃ | Moyenne | Ecart type |
|-------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|---------|------------|
| MBV | 2,34 | 2,68 | 2,47 | 2,54 | 2,55 | 2,52 | 0,11 |

Il peut être noté que l'épaisseur du spécimen est un paramètre important. Une différence de 0,41 g/m²%HR est enregistrée entre les MBV des deux types d'échantillons du béton de bois (gros, moyens: 42, 18 mm d'épaisseur). Cerolini et al (2009) ont trouvé que la variation de l'épaisseur du matériau affecte la teneur en eau maximale et finale du système (panneau en cellulose) jusqu'à ce que l'épaisseur atteigne 50 mm. Au-delà de cette valeur, l'augmentation de l'épaisseur du matériau ne contribue plus significativement à la variation des quantités examinées et le système montre une réponse stable aux changements d'épaisseur. Par ailleurs, l'exposition à double face réduit également l'épaisseur efficace du matériau de la moitié de sa valeur si une seule face est exposée. Selon McGregor et al (2014), la MBV est fortement influencée par la vitesse de la diffusion de la vapeur d'eau à travers le matériau.

**Figure IV-12** : Cycles MBV des échantillons moyens de béton de bois

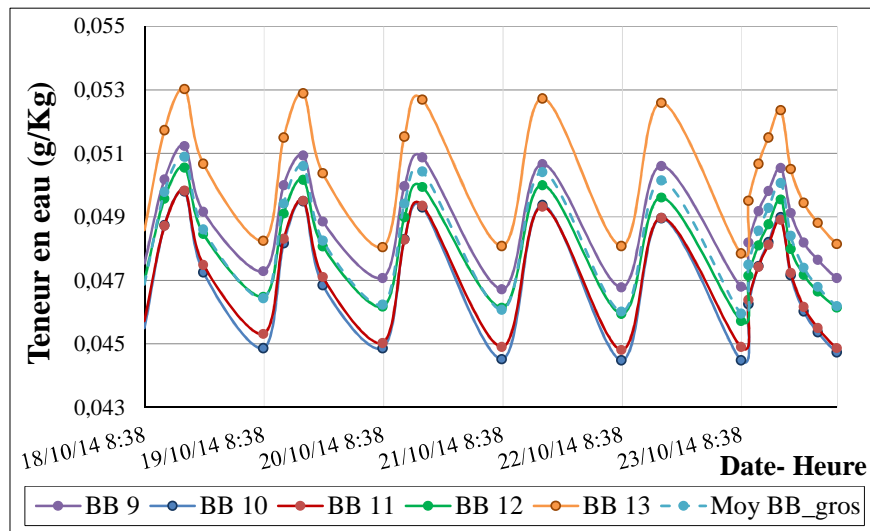


Figure V-13 : Cycles MBV des gros échantillons de béton de bois

Des mesures similaires ont été réalisées sur des briques de terre crue, la pierre de travertin et le plâtre (voir annexe II). Le tableau IV-5 énonce les résultats finaux.

De ces résultats, il peut être souligné que la méthode MBV offre une catégorisation très pratique des matériaux. Des différences cohérentes de la capacité d'amortissement des variations d'humidité relative ont été trouvées entre les différents matériaux testés, selon leur nature. La brique de terre et le béton de bois ont montré des vitesses élevées d'ajustement aux variations de %HR. Ils ont donné les meilleurs tampons, tandis que les matériaux comme la plaque de plâtre et la pierre travertin ont exhibé des tampons inférieurs, Figure IV-14.

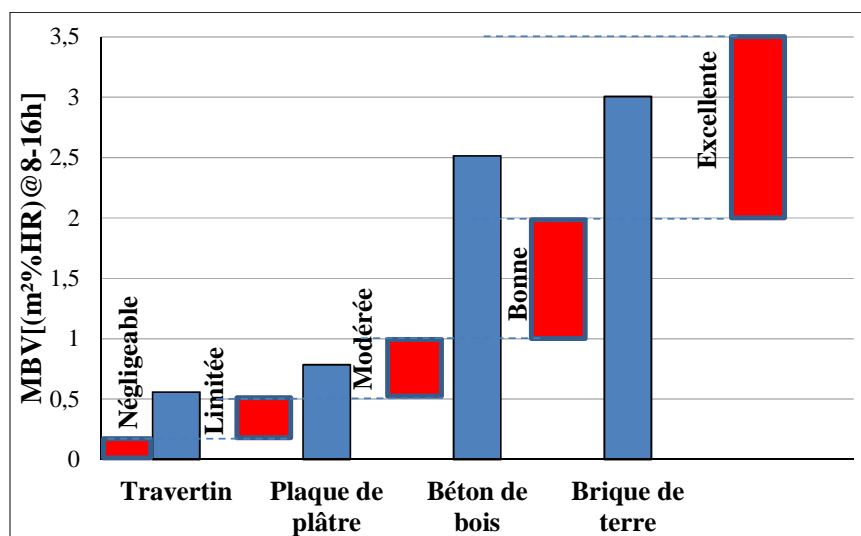


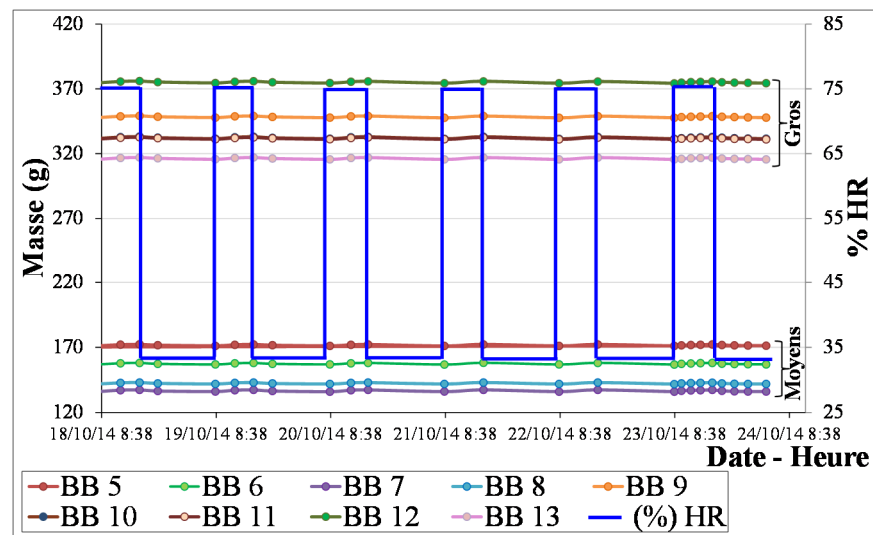
Figure IV-14 : MBV pratiques des matériaux testés, comparées à la classification du projet Nordtest

Tableau IV-5 : Valeurs des MBV des matériaux testés

| Matériau | MBV |
|----------------------|------|
| Brique de terre crue | 3,00 |
| Béton de bois | 2.52 |
| Plâtre | 0,78 |
| Pierre de travertin | 0,56 |

La MBV caractérise surtout les variations journalières de l'humidité de courtes périodes ou de durée horaire qui se produisent principalement en raison de l'occupation, l'activité et les variations diurnes du climat extérieur. Elle donne une idée du comportement du matériau en période d'été, lorsqu'il est utilisé comme un parement dans l'environnement intérieur du bâtiment. Elle caractérise la couche active de la paroi.

Concernant cette couche active, la variation de masse des cinq gros échantillons ($\phi \times h = 91 \times 42$ mm) du béton de bois a été environ 20% plus importante que celle des quatre échantillons moyens ($\phi \times h = 91 \times 18$ mm), Figure IV-15. Ceci signifie que sur une période de 24h, la profondeur de pénétration dans le matériau est supérieure à 18 mm, en notant que l'amplitude de la variation de %HR diminue avec la profondeur.

*Figure IV-15 : Variation de masse des moyens et gros échantillons lors des cycles MBV*

D'autre part, l'échantillon-test de brique de terre entière instrumenté a également subi le test de la MBV. Deux thermo-hygromètres capacitifs (AHLBORN) ont été aussi placés dans

l'enceinte pour vérifier sa réponse aux changements de cycles. Les capteurs sont de précision de $\pm 2\%$ HR dans la plage $< 90\%$ à T nominale, de $\pm 0,1^\circ\text{C}$ et $\pm 0,6^\circ\text{C}$ dans les gammes 0 à 70°C et 70 à 80°C . Les figures IV-16, 17 donnent les évolutions de T et HR ambiantes dans l'enceinte, des températures au centre et aux surfaces et de l'humidité au centre de la brique de terre pendant les cycles de la MBV.

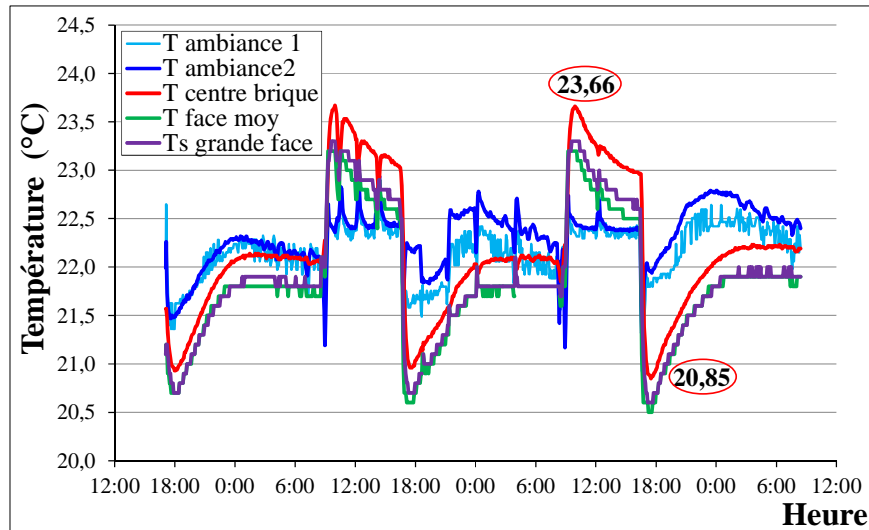


Figure IV-16 : Evolution de la température ambiante dans l'enceinte et des températures au centre et aux surfaces de la brique de terre pendant les cycles de la MBV

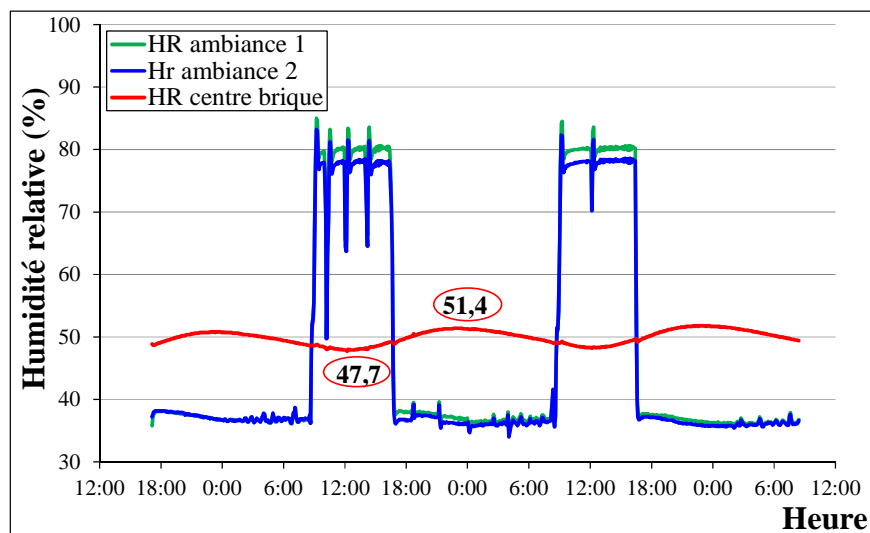


Figure IV-17 : Evolution de l'humidité relative ambiante dans l'enceinte et de l'humidité au centre de la brique de terre pendant les cycles de la MBV

Les mesures dévoilent que l'enceinte n'atteint pas à point les consignes programmées. Le changement de cycles HR fait un peu varier la température et l'humidité relative ambiantes,

mais qui restent dans les limites de précision des capteurs et de l'enceinte. Par ailleurs, le passage de 33 à 75% met environ trente minutes, constaté aussi par Collet et al, (2013). Selon le projet Nordtest, le changement de consigne s'il ne peut être réalisé instantanément, devrait idéalement s'opérer en moins de trente minutes avec $\pm 3\%$ HR de précision. La température prévue doit être maintenue à $\pm 0,5$ °C. Néanmoins Roels et Janssen (2005) ont montré que la durée de passage de cycles HR adsorption/désorption, atteignant même une heure et demie avait un effet limité (inférieur à 5%) sur la valeur de capacité tampon hydrique.

Une amplitude maximale de température de 2,81 °C et un écart maximal de 3,7 %HR ont été enregistrés au centre de la brique entre les deux cycles. Cette amplitude de température, nettement supérieure à celle de l'enceinte, est causée par l'effet de la chaleur de sorption, suite à l'oscillation de l'humidité relative.

2. Caractérisation des propriétés de transfert de chaleur

2-1. Mesure de la conductivité thermique

A chaque stabilisation du palier en HR durant la mesure des isothermes de sorption, des mesures de la conductivité thermique des quatre matériaux ont été menées employant la méthode du disque chaud (Figure IV-18). Cette technique, basée sur le principe des sources planes transitoires (TPS – Transient Plane Source), donne directement accès à la conductivité thermique [Gustafsson 1991]. Une fine sonde (schématisée en Figure IV-19) est placée entre deux blocs du matériau à mesurer. La sonde est constituée d'un fil de nickel enroulé en forme d'une double-spirale et inséré dans un film en Kapton. La sonde joue à la fois un rôle de source surfacique de chaleur (par effet joule) et de capteur mesurant l'élévation de température, via la mesure de la résistance électrique du fil.

La mesure consiste à imposer une puissance électrique (thermique par effet joule) à l'échantillon en faisant passer un courant électrique dans la sonde à partir d'un instant $t=0$ et à suivre l'élévation de la température au cours du temps. Les mesures nécessitent deux échantillons de dimensions identiques d'un même matériau dont la taille est de l'ordre de quelques centimètres. Les dimensions minimales des échantillons et le rayon de la sonde à utiliser dépendent des propriétés thermo-physiques du matériau et doivent satisfaire l'hypothèse d'un milieu infini.

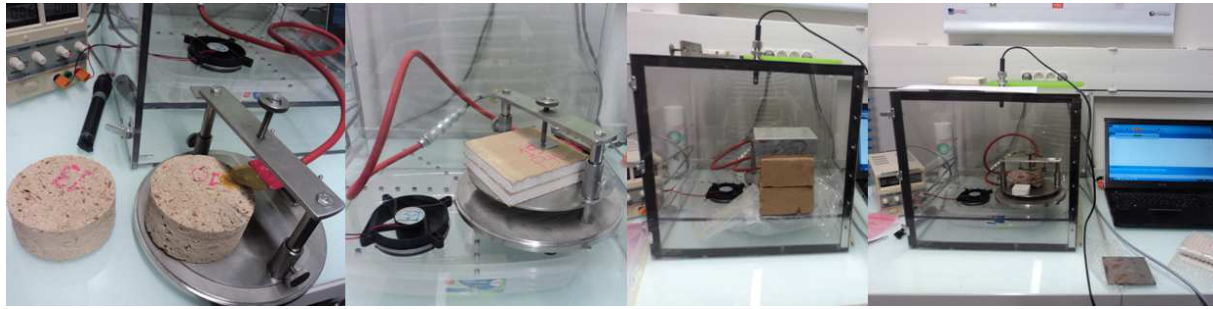


Figure IV-18 : Mesure de la conductivité thermique des différents matériaux par la méthode du disque chaud : béton de bois, plâtre, terre comprimée et le travertin

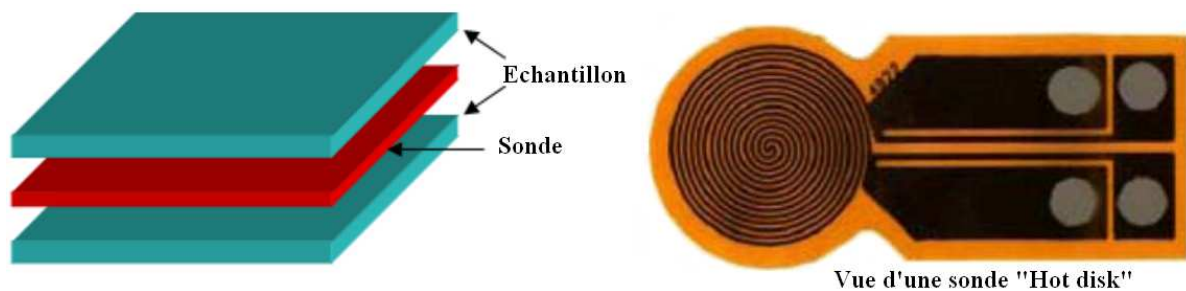


Figure IV-19 : Principe de la méthode du disque chaud

Les résultats de mesure par la méthode de disque chaud montrent que la conductivité thermique des différents matériaux étudiés dépend de la température et de la teneur en eau :

$$\lambda = f(T, w) \quad (\text{IV.8})$$

Pour le cas du béton de bois, la conductivité thermique varie entre 0,31 et 0,42 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Figure IV-20). Elle varie linéairement avec la teneur en eau selon l'équation :

$$\lambda = 0,2782 + 1,3444 \times w \quad (\text{IV.9})$$

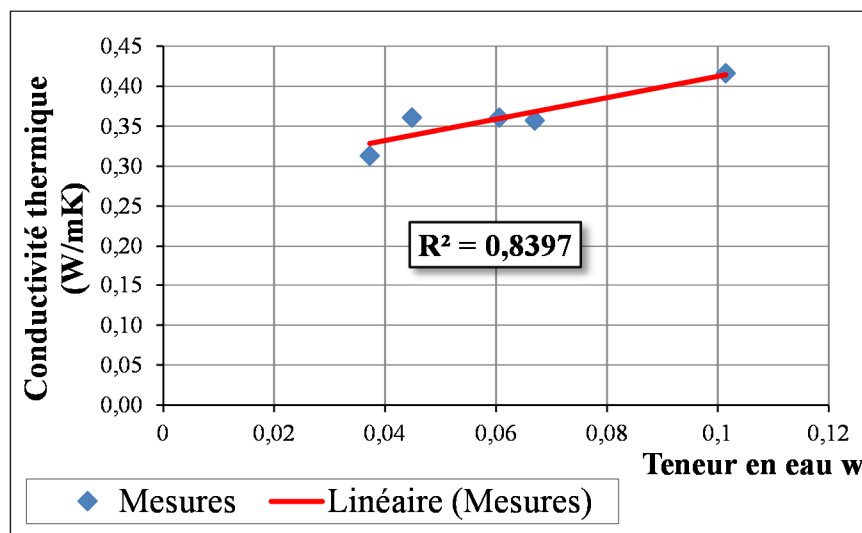


Figure IV-20 : Variation de λ en fonction de w , cas du béton de bois

Evrard, (2008) a également obtenu des variations linéaires de la conductivité thermique avec la teneur en eau, dans le cas du béton de chanvre. De même Tang et al, (2008), Hall et Allinson, (2009) ont constaté la proportionnalité linéaire de λ à w dans les cas de la bentonite et du pisé.

Concernant la brique de terre crue, la conductivité thermique varie entre 0,77 et 0,95 Wm⁻¹K⁻¹ (Figure IV-21), et de façon linéaire :

$$\lambda = 0,674 + 6,1267 \times w \quad (\text{IV.10})$$

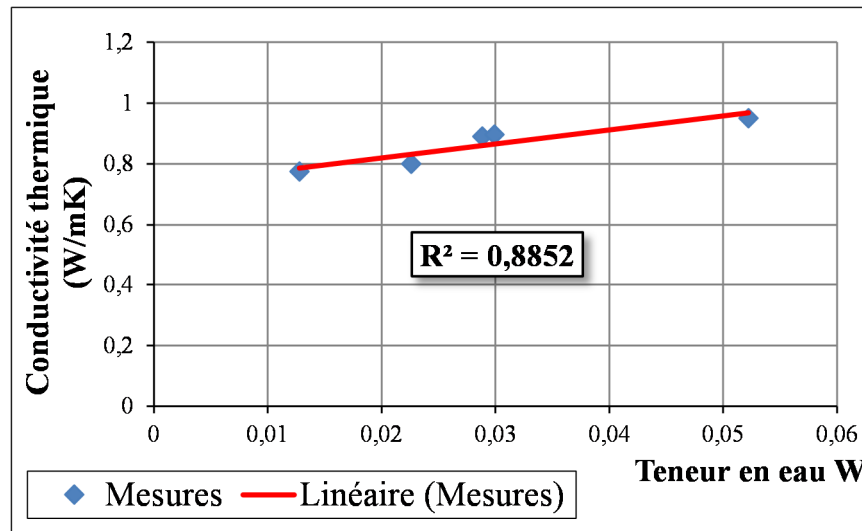


Figure IV-21 : Variation de λ en fonction de % w , cas de brique de terre

La conductivité thermique de la pierre travertin varie entre 1,47 et 1,55 W.m⁻¹.K⁻¹ en accord avec les valeurs trouvées dans les rares littératures menées sur ce matériau ou sur les calcaires semi-fermes en général [Lemaire, 2012]. Les valeurs trouvées dans [Hegger et al, 2009] sont conformes aux tufs calcaires plutôt qu'au travertin (voir tableau IV-6 et Figure IV-22). La conductivité thermique du travertin est proportionnelle à la teneur en eau avec un rapport de :

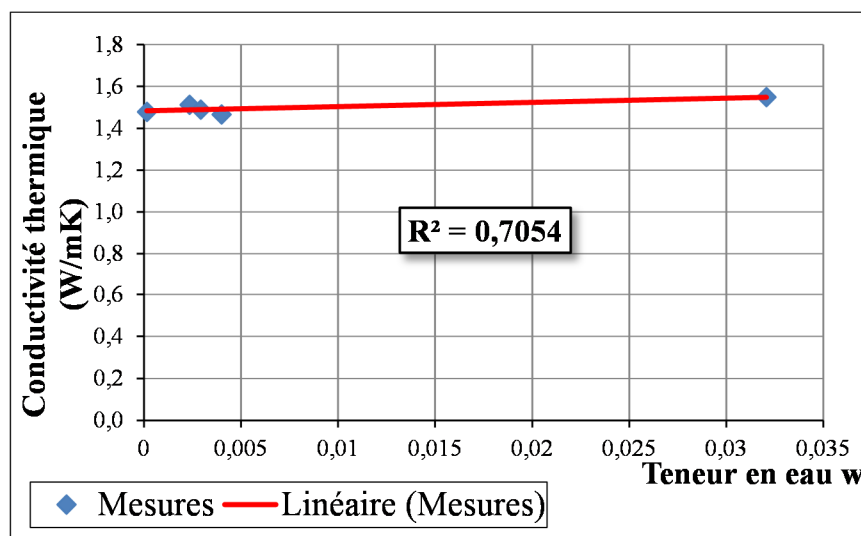
$$\lambda = 1,4831 + 2,0556 \times w \quad (\text{IV.11})$$

La linéarité de λ à w a été également constatée dans le cas des céramiques [Tong et al, 2009], [Nait-Ali et al, 2013].

Tableau IV-6 : Caractéristiques du travertin

| Pierre | Densité (Kg/m ³) | Résistance à la compression (N/mm ²) | Conduction thermique (W/mK) | Capacité thermique (KJ/m ³ K) | Coefficient de dilatation thermique mm/mK) | Indice de la résistance à la vapeur(-) | Résistance à l'Abrasion (cm ³ /50cm ²) | Absorption d'eau (Mass %) | Résistance au gel |
|-----------------|---------------------------------|--|-----------------------------------|--|---|--|---|---------------------------------|----------------------|
| Tuf calcaire | 1700 - 2200 | 30 - 50 | 0,85 – 1,7 | 2290- 2380 | 0,003 - 0,007 | 20/200 | n.b. | 1 - 10 | • |
| Travertin | 2400 - 2500 | 20-60 | 2,3 | 2290- 2380 | 0,0068 | 200/250 | 20-45 | 2-5 | • |

(Source : Hegger et al, 2009)

*Figure IV-22 : Variation de λ en fonction de % w , cas du travertin*

La conductivité thermique de la plaque de plâtre, varie entre 0,21 et 0,39 W.m⁻¹.K⁻¹ (Figure IV-23). Ces valeurs sont conformes aux données trouvées dans les avis techniques du fabricant. Elle est proportionnelle à la teneur en eau avec un rapport de :

$$\lambda = 0,1673 + 1,3833 \times w \quad (\text{IV.12})$$

La proportionnalité de la plaque de plâtre à la teneur en eau est également linéaire avec un coefficient de corrélation de 0,98. Cerny et al, (2006) ont montré la linéarité de λ à w dans le cas des enduits à base de chaux.

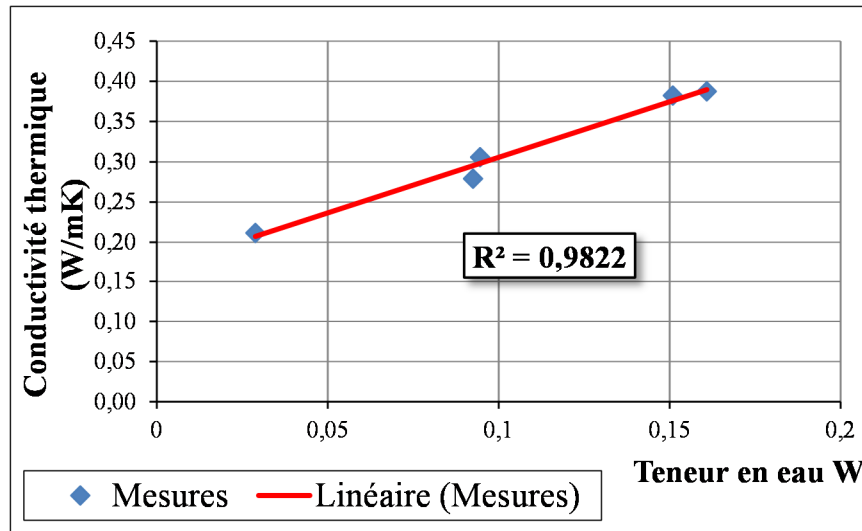


Figure IV-23 : Variation de λ en fonction de % w, cas de la plaque de plâtre

Il est remarqué que la conductivité thermique de la plaque de plâtre a bien diminué (de 0,39 à 0,21 $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) avec les conditions de séchage sévères (à 103 °C). Ce résultat cohérent est induit par l'évacuation d'une part plus grande de l'eau physiquement liée.

2-2. Masse volumique et capacité thermique

Ces grandeurs dépendent essentiellement de la teneur en eau w . Les valeurs correspondant au matériau humide (indice h) peuvent s'obtenir aisément par la loi des mélanges, avec deux composants qui sont le matériau sec (indice s) et l'eau (indice e) :

$$\rho_h = \rho_s (1 + w) \quad (\text{IV.13})$$

$$C_h = \frac{C_s + wC_e}{1 + w} \quad (\text{IV.14})$$

Avec ρ_h : la masse volumique humide ; ρ_s : la masse volumique sèche ; w : la teneur en eau ; C_e : la capacité thermique de l'eau ($C_e = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) ; C_s (ou C_p) : la capacité thermique sèche (ou capacité calorifique à pression constante) ; C_h : la capacité thermique humide.

La masse volumique sèche du béton de bois a été mesurée directement sur les échantillons testés (moyen et gros, à l'exception des petits). Elle varie entre 1090 à 1294,89 kg/m^3 avec une valeur moyenne de 1212,03 kg/m^3 .

Les valeurs de C_s peuvent également être déterminées expérimentalement par des méthodes calorimétriques. Les mesures de la capacité calorifique des quatre matériaux ont été menées par le calorimètre C80 Calvet (de Setaram), de type différentiel (Figure IV-24). Son principe est fondé sur la comparaison des phénomènes thermiques entre deux cellules identiques placées au sein d'une masse thermostatée : une cellule contenant l'échantillon et une cellule de référence, maintenue généralement vide, mais pouvant aussi contenir un matériau inerte thermiquement sur le domaine de température étudiée. Tout autour des deux cellules, l'instrument est appareillé par des thermocouples. La forme de l'échantillon à tester n'a pas a priori d'importance, il peut être solide ou pulvérulent.

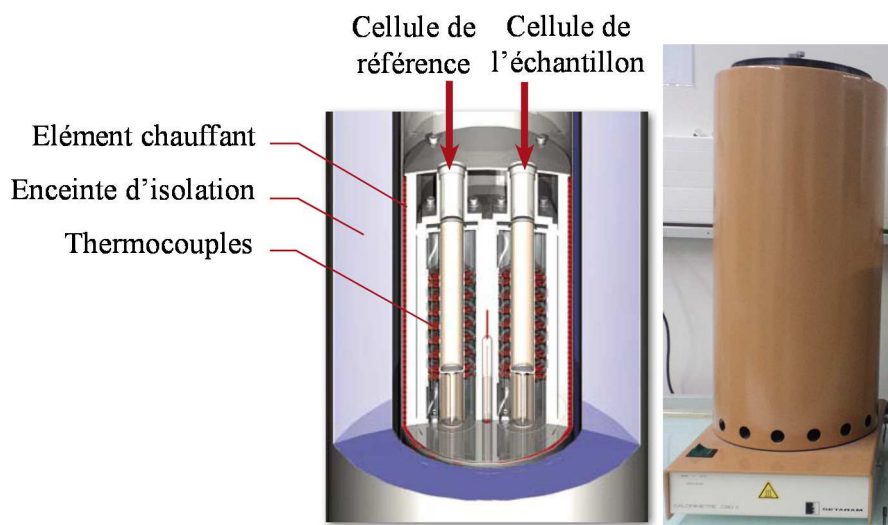


Figure IV-24 : Schéma et photographie du calorimètre Calvet C80 de Setaram

La mesure de la capacité calorifique ne nécessite que deux expériences. La première, un blanc avec les deux cellules vides. La deuxième, avec l'échantillon testé et une cellule vide. Un cycle thermique précis est recommandé à cause de la forte inertie du four. Au départ, une stabilisation à 30°C pendant 02 heures, puis une montée en température jusqu'à 110 °C avec, dans notre cas une rampe de 0,2 °C/min. La capacité calorifique est ensuite déduite de la formule suivante :

$$C = \frac{A_e - A_B}{M \cdot v} \quad (\text{IV.15})$$

A_e et A_B représentent les puissances moyennes mesurées (mW), respectivement pour l'échantillon et le blanc ; M est la masse de l'échantillon ; v concerne la vitesse de montée en température.

La mesure de C_p des quatre matériaux a été effectuée une par une. Des échantillons de béton de bois, de la brique de terre, de la pierre et de la plaque de plâtre ont été broyés, puis mises à l'étuve pendant 24h à une température de 110°C. En parallèle, l'expérience du blanc a été lancée à l'avance pour une durée de 48h. A la sortie de l'étuve, l'échantillon est pesé avec une balance électronique de haute précision. Il convient de ne pas dépasser la masse recommandée du matériau à tester. La cellule de l'échantillon est ensuite introduite dans le calorimètre à l'aide d'une tige (Figure IV-25).



Figure IV-25 : Mesure de la capacité calorifique : mise à l'étuve de l'échantillon broyé, pesage, introduction dans la cellule et traitement de données

Les mesures donnent une capacité calorifique sèche variant entre 952,65 (à 40°C) à 1035,80 J/kgK (à 100°C) pour le béton de bois (Figure IV-26). Ces valeurs montrent que le matériau est de bonne capacité de stockage thermique.

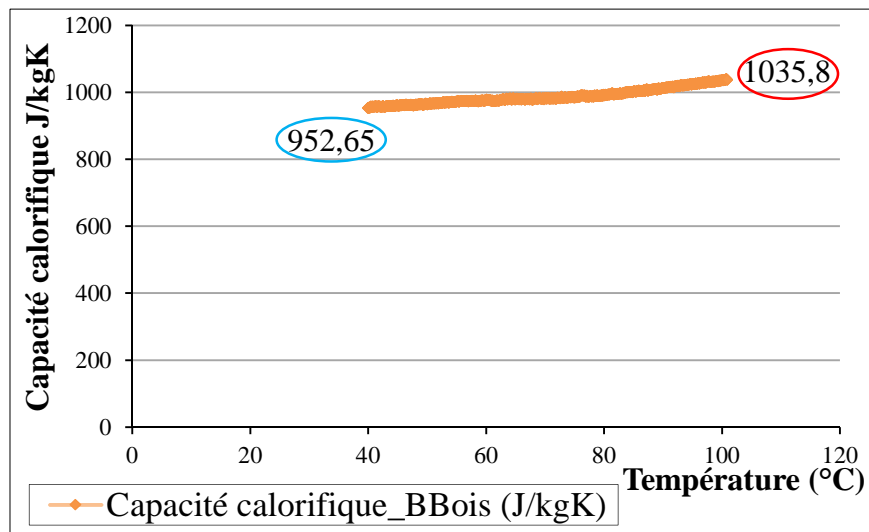


Figure IV-26 : Capacité calorifique sèche (état anhydre) du béton de bois

Dans le cas de la brique de terre, les mesures effectuées sur ses trois échantillons donnent une masse volumique sèche variant entre 1761,87 et 1797,59 kg/m³ avec une valeur moyenne de 1778,88 kg/m³. La capacité calorifique sèche de la brique de terre varie entre 817,62 (à 40°C) à 877,32 J/kgK (à 100°C) (Figure IV-27).

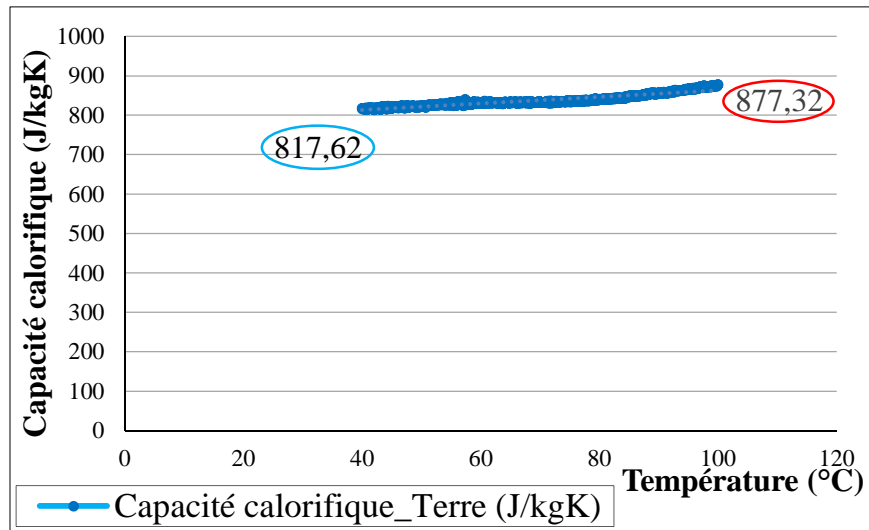


Figure IV-27 : Capacité calorifique sèche (état anhydre) de la brique de terre

La masse volumique sèche mesurée de la pierre varie entre 2228,57 kg/m³ et 2025,06 kg/m³ avec une valeur moyenne de 2126,82 kg/m³. Quant à la capacité calorifique, elle fluctue entre 835,64 (à 40°C) à 945,54 J/kgK (à 100°C) (Figure IV-28). Il s'agit d'un matériau de bonne capacité thermique, ce qui justifie son bon comportement thermique avec l'effet de l'inertie thermique constatés au niveau la maison en pierre monitorée.

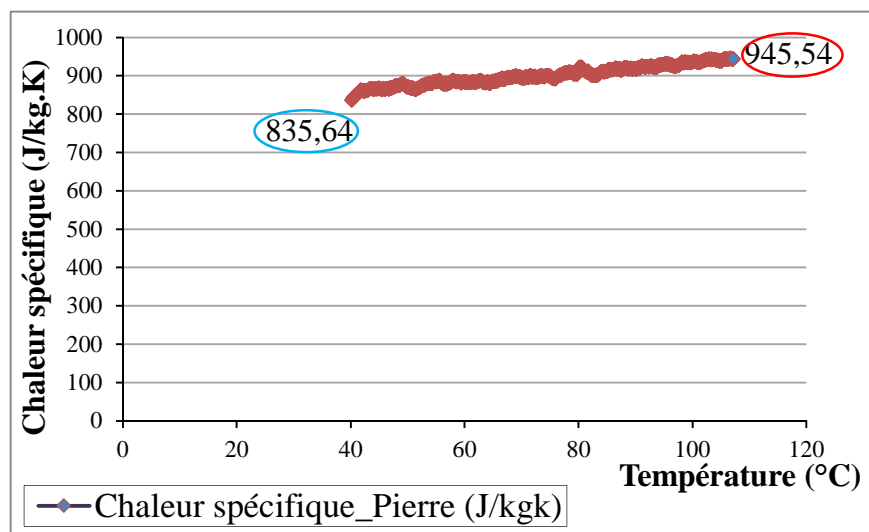


Figure IV-28 : Capacité calorifique sèche de la pierre travertin

La masse volumique sèche mesurée sur les échantillons de la plaque de plâtre varie entre 877,2 kg/m³ et 890,3 kg/m³ avec une valeur moyenne de 885,7 kg/m³. Ces valeurs sont en accord avec celles trouvées dans la littérature sur les caractéristiques techniques de la plaque BA 13. Et d'après les mesures calorimétriques, la capacité calorifique sèche de la plaque de plâtre varie entre 851,98 (à 40°C) à 907,67 J/kgK (à 100°C) (Figure IV-29). Ces mesures indiquent que le matériau est d'une moyenne capacité de stockage thermique.

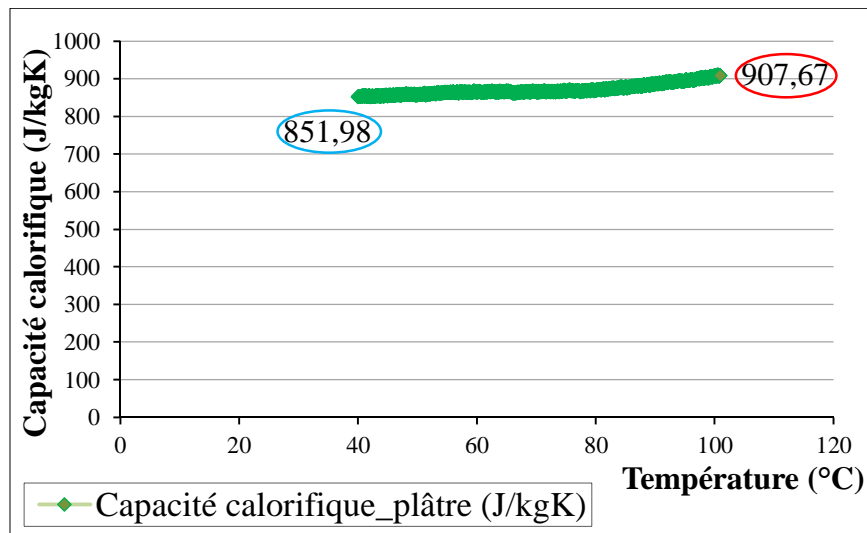


Figure IV-29 : Capacité calorifique sèche de la plaque de plâtre

Conclusion

A l'échelle de l'échantillon, ce chapitre a permis de caractériser les propriétés hygrothermiques des matériaux utilisés dans les autres échelles de ce mémoire. Les résultats montrent que toutes les propriétés thermo hydriques des matériaux sont fortement dépendantes de leur état hygrothermique. Cette dépendance a particulièrement été constatée le cas des paramètres de la conductivité thermique, la masse volumique, la chaleur massique et la MBV. Ceci met bien en évidence la nécessité de prendre en compte « la non-linéarité » des paramètres thermophysiques dans les modèles de transferts [Woloszyn et al, 2014].

Cette étude à l'échelle du matériau permet de disposer désormais des valeurs des différents paramètres intrinsèques au matériau, indispensables comme entrées dans les modèles de calcul.

Chapitre V

Etude thermo hydrique à l'échelle de la paroi

*« Les détails font la perfection, et la perfection n'est pas un détail. »
Léonard de Vinci*

Introduction

L'expérimentation à l'échelle de la paroi, en tant qu'un système composite hétérogène a été menée dans le cadre de l'utilisation d'une enceinte bi-climatique. Cette échelle représente ainsi la dimension intermédiaire permettant de passer de l'échelle matériau à l'échelle d'une enveloppe complète. De plus, les dimensions réelles vis-à-vis du transfert de masse et de chaleur doivent permettre de caractériser, d'une part, les propriétés de diffusion mais également ses interactions avec le transfert de chaleur. Une paroi de 2m50 de côté, composée de terre crue contreventée par une ossature bois est testée en réponse de sollicitations thermo-hydriques dynamiques. Le protocole expérimental ainsi que l'instrumentation sont présentés. Les mesures en termes de gradients thermiques et hydriques sont confrontées à un modèle numérique. Les résultats sont enfin discutés.

1. Protocole expérimental

1-1. Double enceinte climatique

Un prototype de double chambre climatique, modèle « KELVINtec », destiné à l'étude des transferts thermo hydriques a été conçu sur le site du Centre Universitaire Génie Civil d'Egletons (Figure V-1).

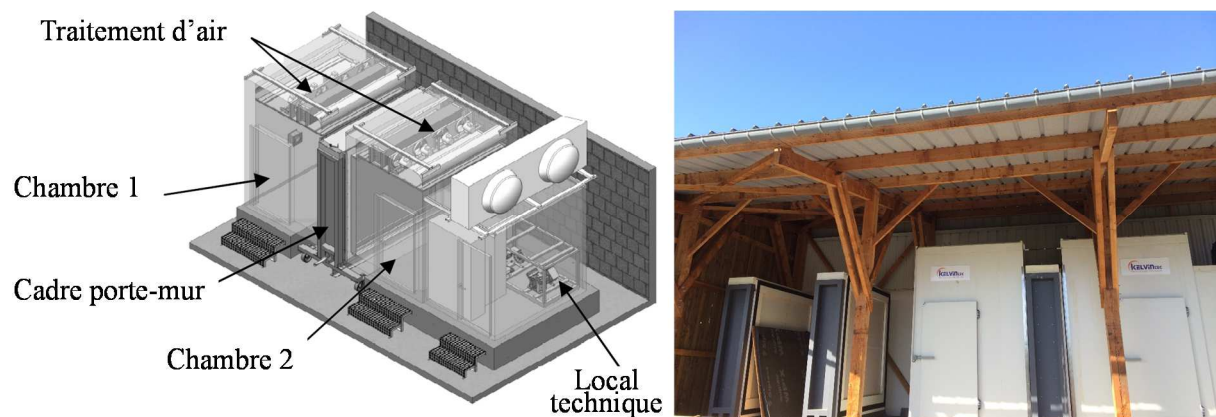


Figure V-1 : Enceinte bi-climatique : volume schématique et vue de face

Le prototype est composé de deux enceintes climatiques autonomes en termes, d'une part, de régulations thermique et hydrique et, d'autre part, de bilan enthalpique et hydrique. Dans ce travail de thèse, son utilisation a pour objectif de définir le comportement hydrique dynamique sous conditions thermiques, avec des essais sur murs ou ouvrant ou système combiné. Les deux

enceintes sont séparées par un porte échantillon pouvant accueillir un mur d'une hauteur de 2m40 et d'une largeur de 2m50 avec une épaisseur pouvant atteindre 50 cm. Les deux chambres sont formées de panneaux sandwich constituées de 150 mm de mousse rigide de polyuréthane et revêtues de peaux métalliques de 0,63 mm d'épaisseur ($U = 0,144 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$).

L'étanchéité entre le cadre porte-échantillon et les caissons est assurée par des doubles joints pneumatiques, disposés sur le pourtour du cadre lorsque la paroi-test est en place. Un local technique, au niveau d'une troisième chambre accolée, abrite les équipements annexes (compresseurs, pompes, tableau électrique...). Compte tenu de sa taille et de son encombrement important, l'enceinte est actuellement implantée en extérieur et protégée des intempéries par un auvent. Un schéma de principe est montré en Figure V-2.

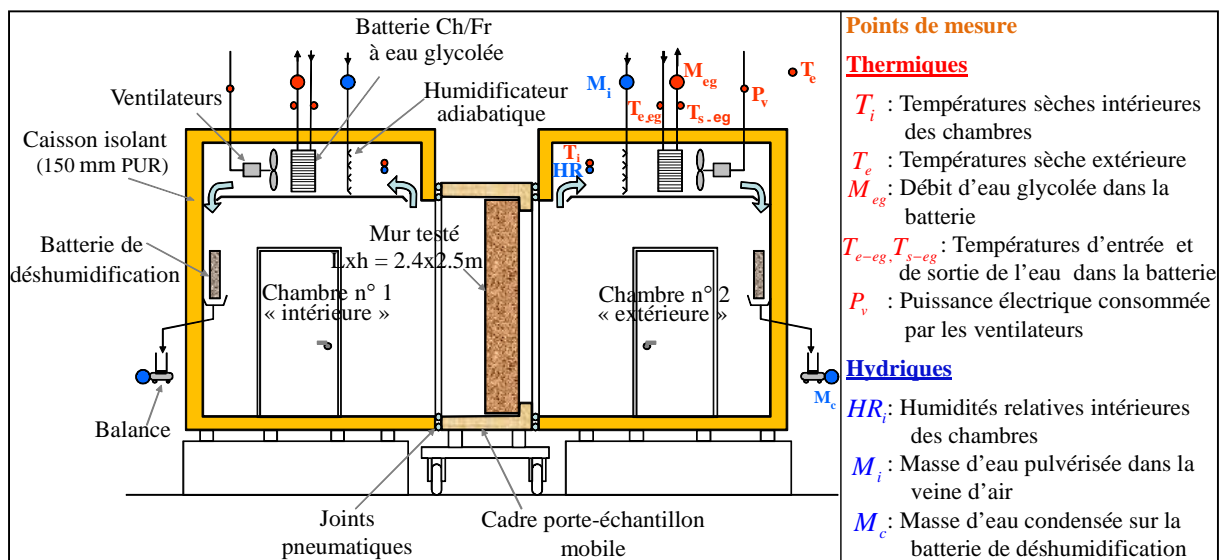


Figure V-2 : Schéma de principe de l'enceinte bi-climatique et points de mesure

1-1-1. Contrôle des ambiances et bilans

Le traitement de l'air est assuré par une batterie à eau glycolée, une rampe d'humidification adiabatique et des ventilateurs. L'ensemble est disposé dans une veine d'air située à l'intérieur et en partie haute de chaque caisson, au-dessus d'un faux-plafond. L'air est repris au voisinage de l'échantillon et soufflé le long de la paroi opposée. La déshumidification est réalisée par condensation de l'air humide sur une batterie froide à détente directe.

Les échanges convectifs entre l'air des deux chambres et les surfaces de l'échantillon sont estimés à partir d'une mesure de la vitesse laminaire de l'air dans chaque enceinte. Egalement, en considérant les dimensions des deux chambres et leur facteur de forme (habillage inox

intérieur), les coefficients d'échanges superficiels sont égaux à 15,5 W/m²K et 16,4 W/m²K pour la chambre dite intérieure et extérieure, respectivement.

Le bilan enthalpique de chaque chambre s'accomplit au niveau des batteries de traitement d'air par mesure du débit d'eau glycolée, et des températures d'entrée et de sortie de celle-ci. Le bilan hydrique s'appuie sur une différenciation entre un comptage de l'eau pulvérisée et une pesée automatique des condensats recueillis. En outre, il convient de corriger le bilan enthalpique par la puissance thermique dégagée par les ventilateurs, qui est intégralement récupérée par l'ambiance. La puissance thermique est évaluée par mesure de la puissance électrique active sur la ligne d'alimentation de chaque groupe de ventilateurs (de l'ordre de 770 W par chambre).

1-1-2. Performances et caractéristiques de l'enceinte

Les performances de l'équipement ont été validées par un essai conforme à la norme NF X 15-140 [AFNOR, 2002], elles concernent :

- La chambre 1, dite « intérieure » : +10°C à +30°C ;
- La chambre 2, dite « extérieure » : -20°C à +50°C ;
- Les couples température / humidité relative possibles : limités par $T_{rosée} < 4^{\circ}\text{C}$;
- La vitesse de variation de température : ± 1 K/minute ;
- La stabilité temporelle : ± 0.5 K, ± 2 %HR ;
- L'homogénéité spatiale : ± 1 K, ± 5 %HR.

Il a été également nécessaire d'évaluer très précisément les flux parasites traversant les parois externes des deux chambres pour parvenir aux flux échangés par la paroi étudiée. Les résultats du calibrage de l'enceinte sont présentés dans [Ulmet et al, 2012].

1-2. Instrumentation du mur de terre crue

Un mur de briques de terre crue comprimée, de 10 cm d'épaisseur et supporté par une ossature bois, est soumis en amont et en aval aux conditions contrôlées en température et en hygrométrie des deux chambres [Gouny, 2013]. Les briques ont été fournies par le Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction (CTMNC). Lors de sa construction, le mur a été appareillé dans deux parties, gauche et centrale, par 5 thermo-hygromètres capacitifs chacune. Ces derniers ont été intégrés dans les briques à différentes profondeurs afin de mesurer

les gradients thermique et hydrique durant les différents essais. Espacés de 10 mm dans l'épaisseur, les capteurs ont été disposés à mi-hauteur de la paroi dans des cavités prévues à cet effet, Figure V-3. La nomenclature est donnée dans la Figure V-4.

Afin de perturber le moins possible les flux traversant, les capteurs ont été décalés spatialement. L'instrumentation est complétée par des sondes de température de surface (thermocouples). Enfin, les mesures intègrent également la température et l'humidité relative des deux chambres, mesures récoltées par le système informatique de régulation.

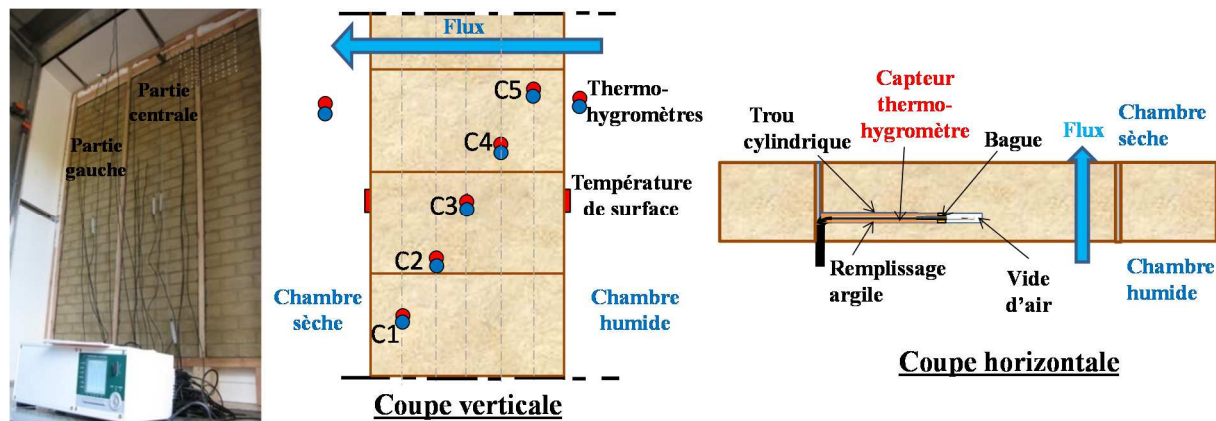


Figure V-3 : Monitoring et points de mesure de la paroi en terre

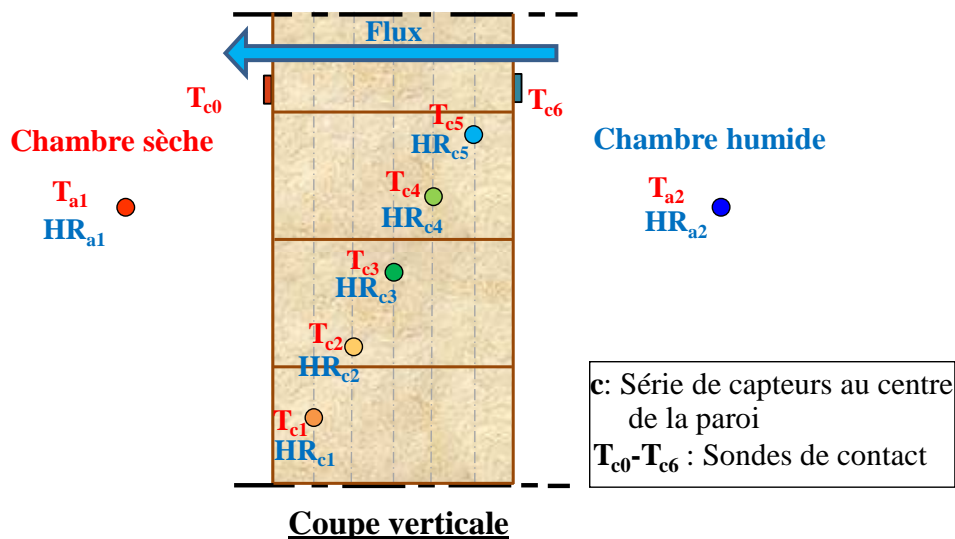


Figure V-4 : Nomenclature des capteurs de mesure

2. Chargements hydriques

2-1. Séchage du mur et stabilisation sous gradient

Les briques étant saturées d'eau en sortie d'usine, la paroi a d'abord subi une première phase de séchage. Les deux chambres ont donc été réglées pendant 24 jours à 50 % HR (Figure V-5) et conditionnées à la même température de 23 °C (Figure V-6). Selon les données mesurées initialement, la température relativement homogène de la paroi était de 23°C. Cette phase de conditionnement en température et en humidité relative constantes avait pour objectif d'imposer des conditions initiales uniformes sur l'ensemble de la paroi. De plus, la situation isotherme des deux côtés permet d'éliminer la contribution du gradient de température au transfert massique dans le matériau.

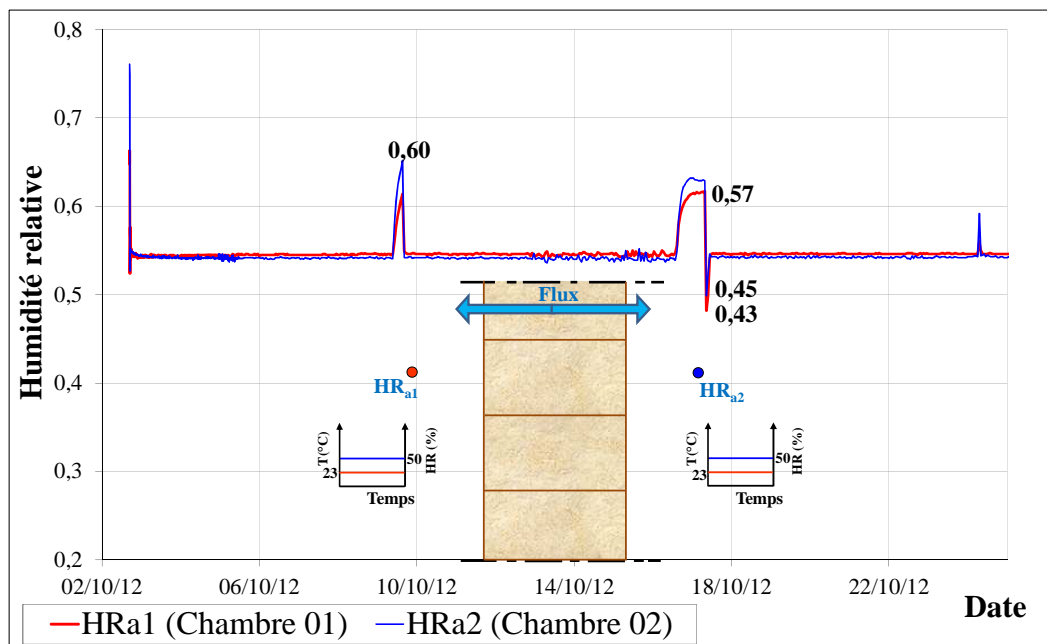


Figure V-5 : L'humidité relative ambiante lors de la 1^{ère} phase de séchage à 50%HR

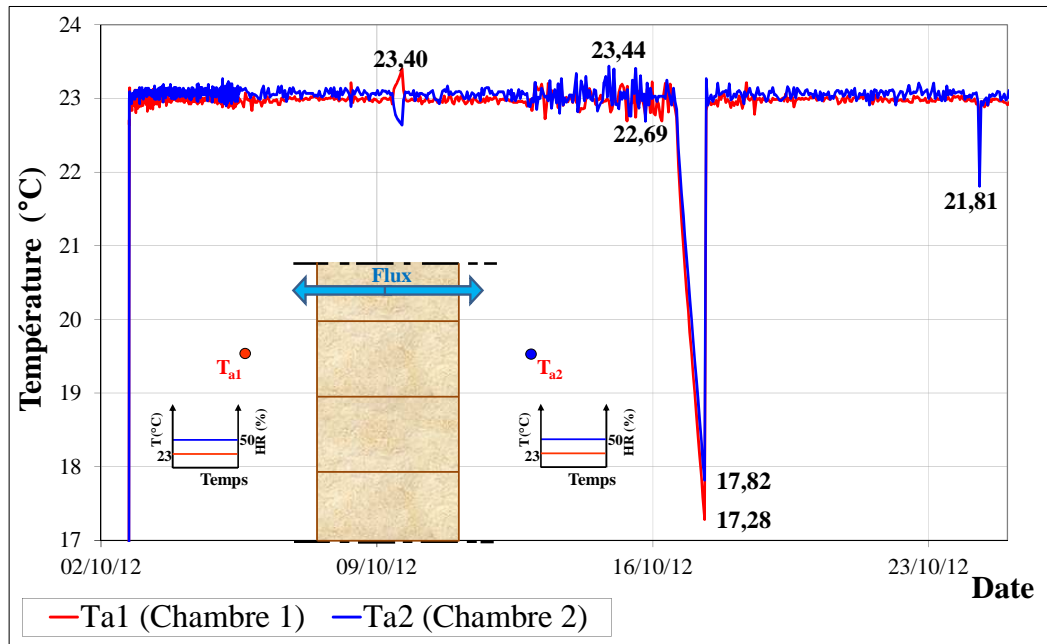


Figure V-6 : Température ambiante lors de la 1^{ère} phase de séchage à 50 %HR

Concurremment, l'état hydrique au sein du matériau a été suivi jusqu'à l'équilibre hydrique. Initialement, l'humidité relative au cœur de la paroi varie entre 81 et 76 % HR pour atteindre 50 %HR après trois semaines, Figure V-7.

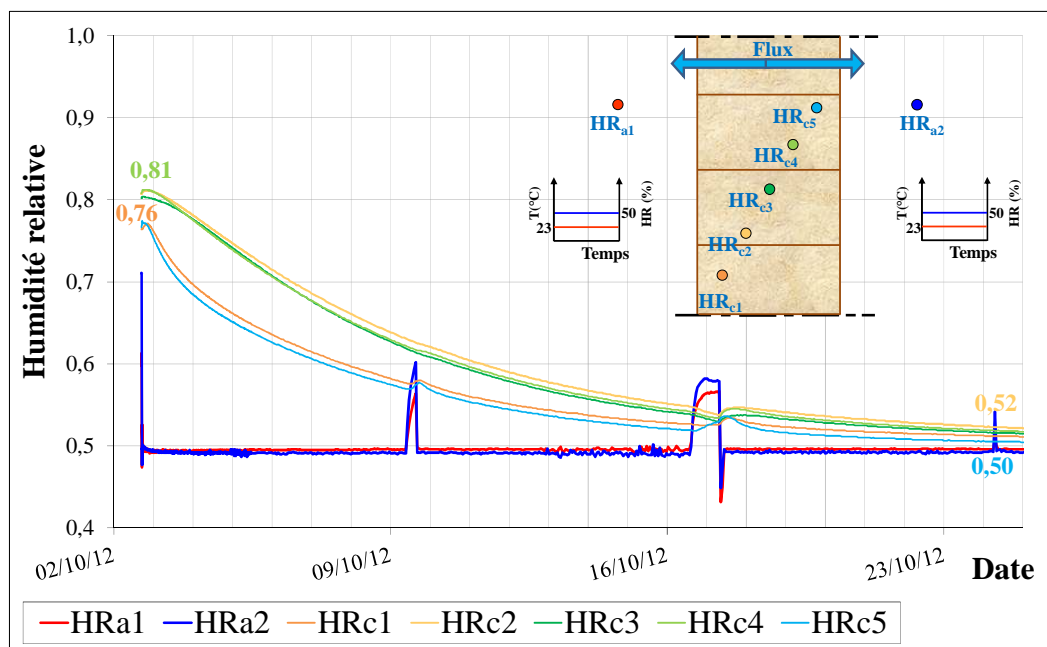


Figure V-7 : Evolution de l'humidité relative dans la paroi lors de la 1^{ère} phase de séchage à 50 %HR

Or, la température dans les cavités de la partie centrale de la paroi, après la régulation de 50 %HR, augmente arrivant la première semaine à des valeurs entre 22,86 - 22,92 °C. La température atteint ensuite la consigne aux alentours de 22,97°C (T_{C1}) après la troisième semaine du début de la régulation, Figure V-8. Egalement les thermocouples affichent des températures de surface (T_{C0} et T_{C6}) proches de la consigne 23°C.

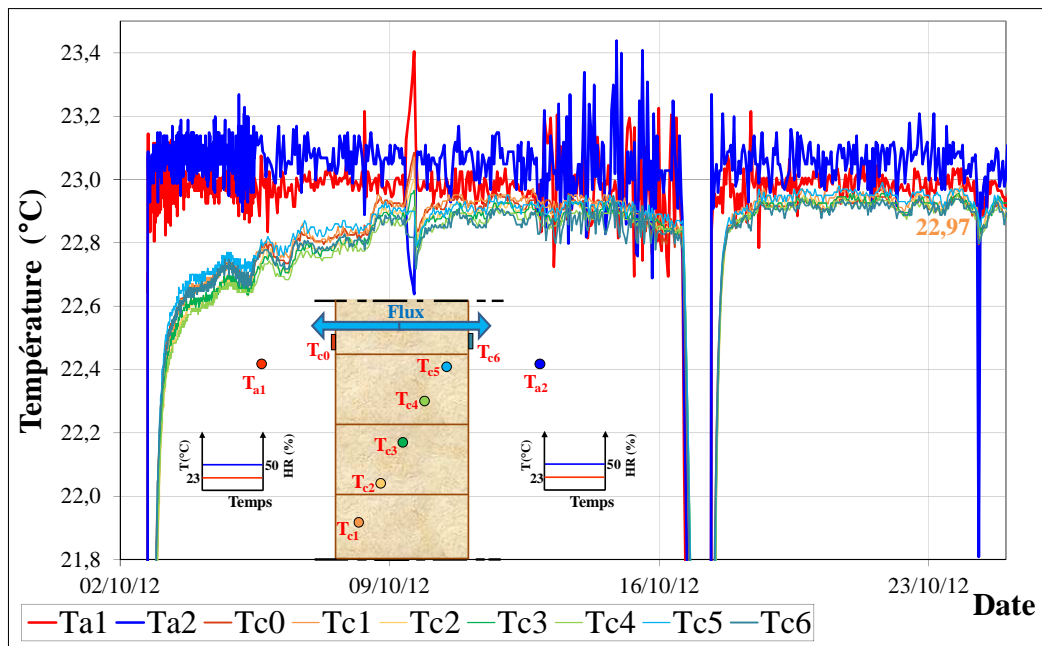


Figure V-8 : Distribution de température dans la paroi

A noter que les capteurs placés dans la partie gauche et centrale de la paroi donnent des profils de température et d'humidité parfaitement identiques.

2-2. Gradients d'humidité relative 50-80 %HR

Toujours à température constante, un caisson est continuellement régulé à 50%HR lorsque l'humidité relative est maintenue à 80%HR dans le deuxième caisson pendant 36 jours. Les Figures V-9 et V-10 présentent respectivement les évolutions temporelles de l'humidité et la température dans les deux ambiances des caissons.

La chambre extérieure (humide) a atteint la consigne (50 %HR, 23,14°C) dès les premiers jours du chargement, mais qui l'a dépassé légèrement arrivant à 81 %HR et à 22,84 °C.

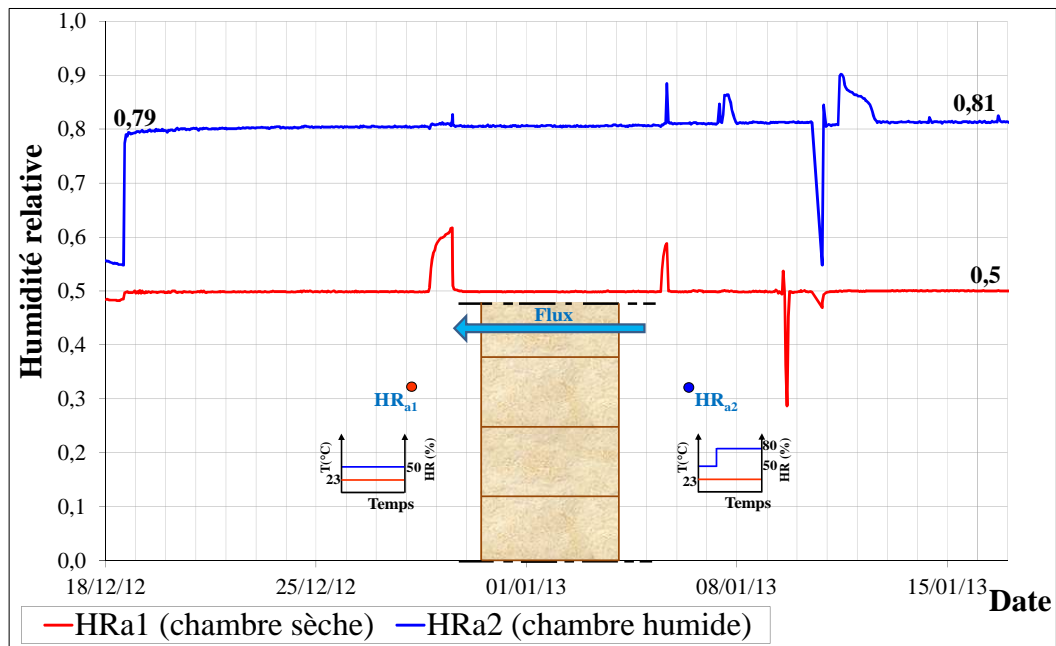


Figure V-9 : Gradient d'humidité relative 50- 80%HR

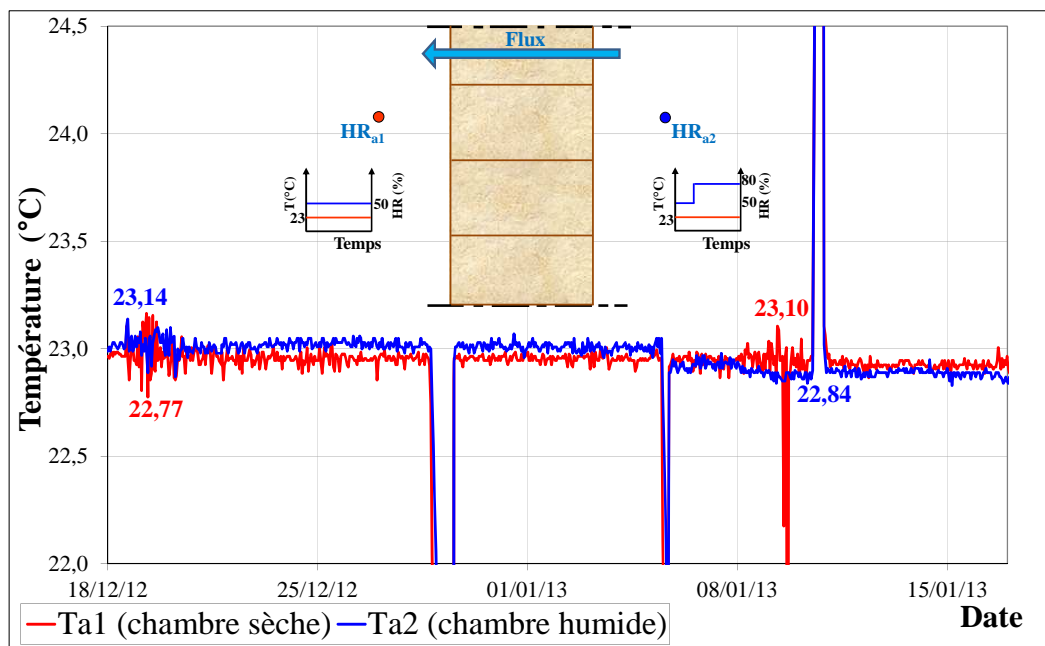


Figure V-10 : Températures ambiantes sous gradient 50%HR-80%HR

La Figure V-11 montre l'évolution du gradient hydrique au sein de la paroi en terre en fonction du temps avec un régime d'équilibre atteint 1 mois d'essai. La diffusion hydrique semble bien gouvernée par le gradient HR, créé entre les deux ambiances intérieure et extérieure. Rejoignant l'avis de [Oumeziane, 2012], même en conditions isothermes, la pression de vapeur, la pression capillaire et la teneur en eau sont pilotées par l'humidité relative.

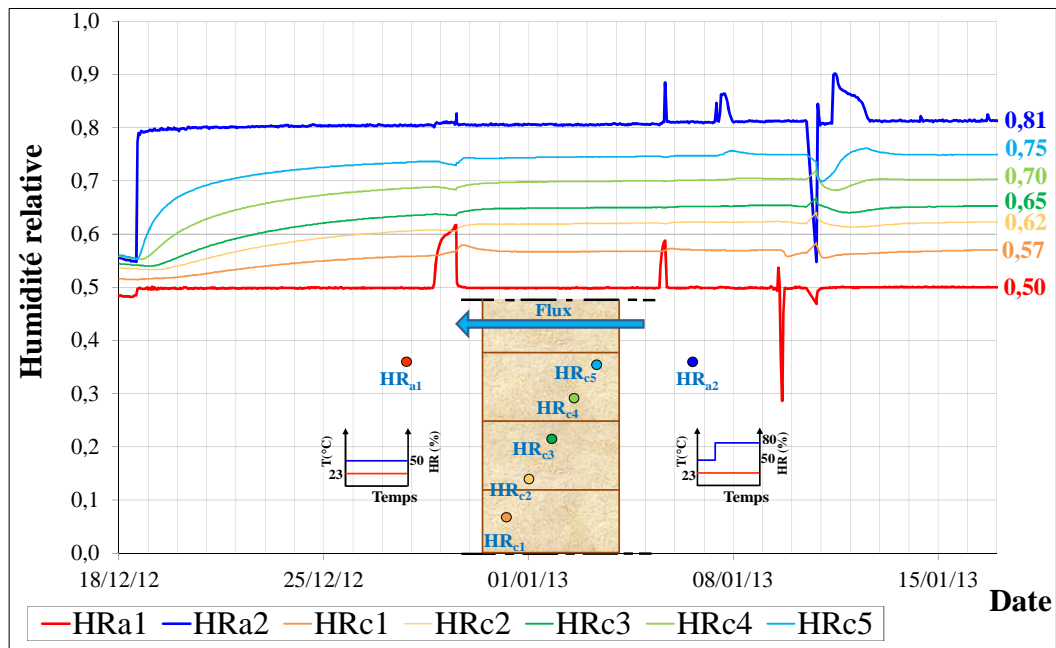


Figure V-11: Profils hydriques dans la paroi sous gradient 50%HR-80%HR

Selon la Figure V-12, l'influence du gradient d'humidité induit localement des variations thermodynamiques. En surface, si les températures sont constantes et égales à 23°C, il en est pas de même à cœur et est sensible au transport hydrique.

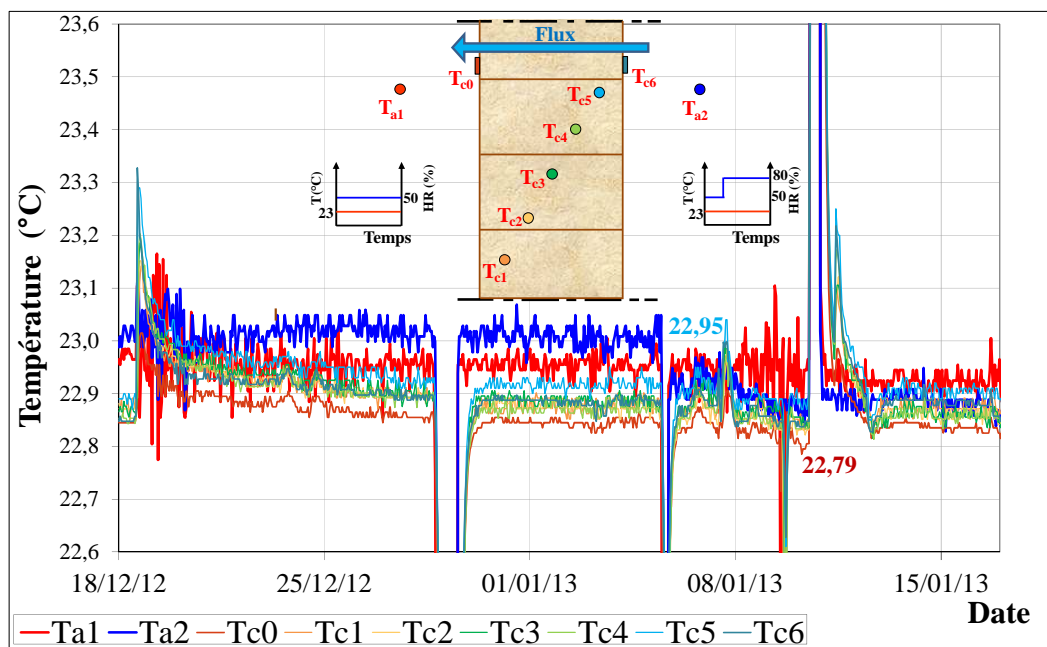


Figure V-12 : Profils de température sous gradient hydrique 50-80 %HR

Précisant que ces comportements thermo hydriques peuvent varier selon la nature de la paroi et les sollicitations qui lui sont appliquées. Il a été démontré que les transferts de masse dépendent non seulement des propriétés des matériaux mais aussi des conditions ambiantes et des matériaux de revêtement [Kwiatkowski, 2009]. Cette partie montre surtout l'impact des conditions ambiantes sur les transferts de masse.

2-3. Gradients d'humidité relative 50-90%HR et comportement libre

Lors du troisième test, les mêmes conditions ont été gardées dans le caisson intérieur (50 %HR, 23°C). Après stabilisation à 50%HR, le caisson extérieur subit, toujours en conditions isothermes, un bref créneau d'humidité relative à 90 % HR d'une demi-heure. Ensuite, la régulation est coupée (régime libre) durant 6 jours. La Figure V-13 montre l'évolution de l'humidité relative dans la paroi avec une plus forte influence côté chambre extérieure. Une oscillation de 2 %HR au sein de la paroi est repérée chaque 10 mm du matériau. L'amortissement hydrique est bien mis en avant selon la profondeur de pénétration de l'humidité dans la paroi, et ce, avec un pic ne dépassant pas 65%HR.

Même si l'évolution de l'humidité relative n'est pas exceptionnelle, le plus intéressant de l'étude concerne l'évolution des températures dans la paroi. Si on se réfère à la Figure V-14, une élévation d'environ 0,8°C est observée durant la période de forte augmentation de l'humidité relative. Evidemment, ce constat est plus marqué en surface de la paroi coté chambre extérieure.

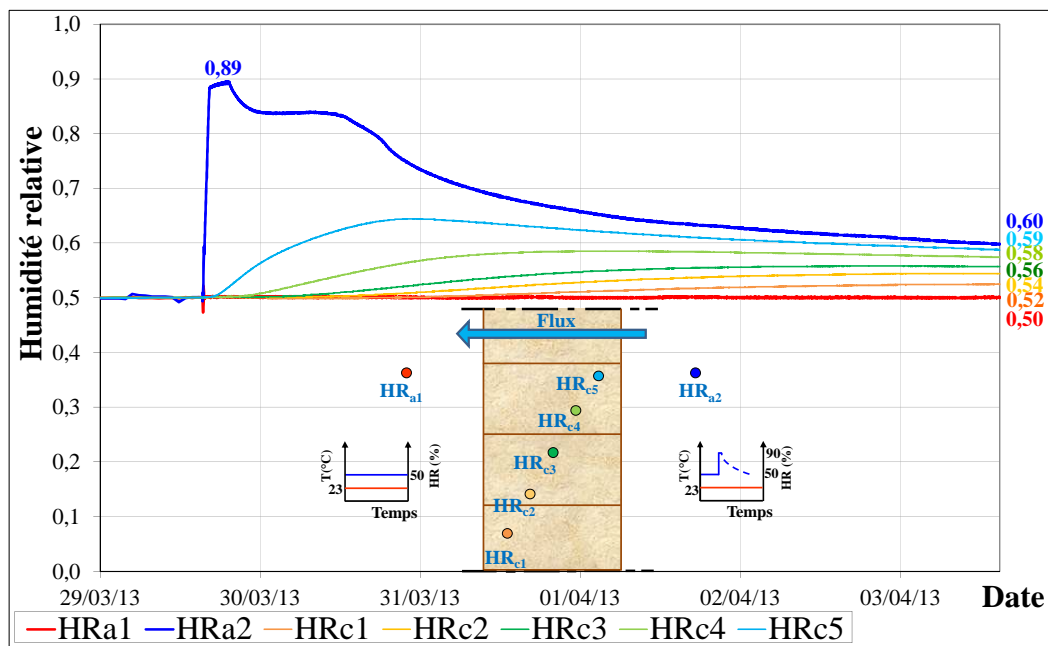


Figure V-13 : Profil d'humidité relative lors d'un choc bref à 90%HR

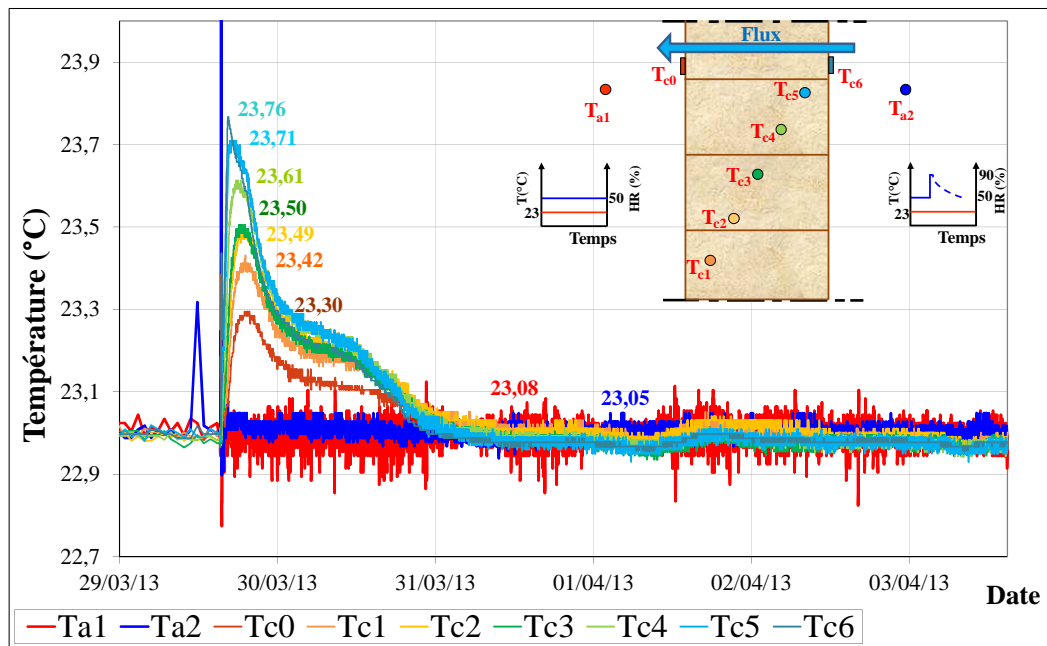


Figure V-14 : Profils de température lors d'un choc bref à 90%HR

Le thermocouple du côté de l'ambiance humide donne une température de surface ($T_{c6} = 23,8^{\circ}\text{C}$). Ceci révèle que surtout les premiers millimètres du matériau qui participent aux échanges hydriques (la couche active). Ce fait justifie l'hypothèse de la température constante prise en conditions initiales et corrobore les résultats de [Kwiatkowski, 2009].

2-4. Créneaux multiples

Continuellement en conditions isothermes et avec les mêmes conditions dans la chambre intérieure (50 %HR, 23°C), des chocs hydriques de 80%HR d'une durée de 30min sont appliqués du côté de la chambre extérieure. Le reste de la journée (23h30), la chambre est laissée en régime libre, Figure V-15.

Comme précédemment, la réponse hydrique est accentuée selon l'emplacement du capteur dans la paroi en terre testée par rapport à la chambre extérieure (humide), Figure V-16. Le cycle de 24 heures imposé ne permettant pas de revenir à l'équilibre, des amplitudes croissantes sont enregistrées. De plus, en profondeur de la paroi, un effet gradient et un effet d'amortissement induit un régime d'équilibre moins marqué.

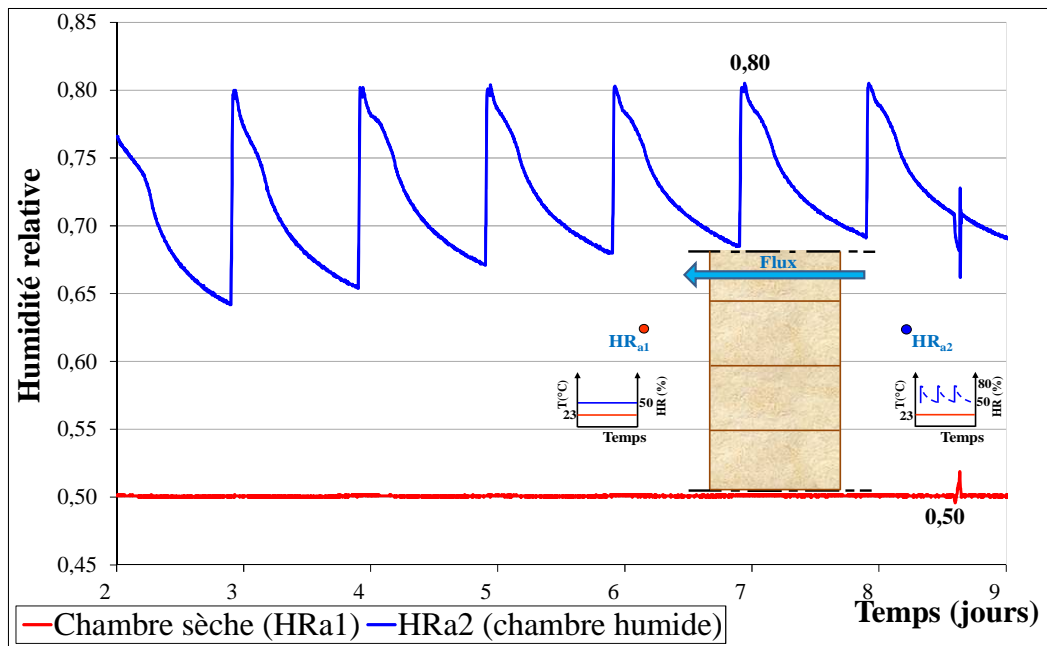


Figure V-15 : Humidité relative ambiante durant des chocs hydriques successifs

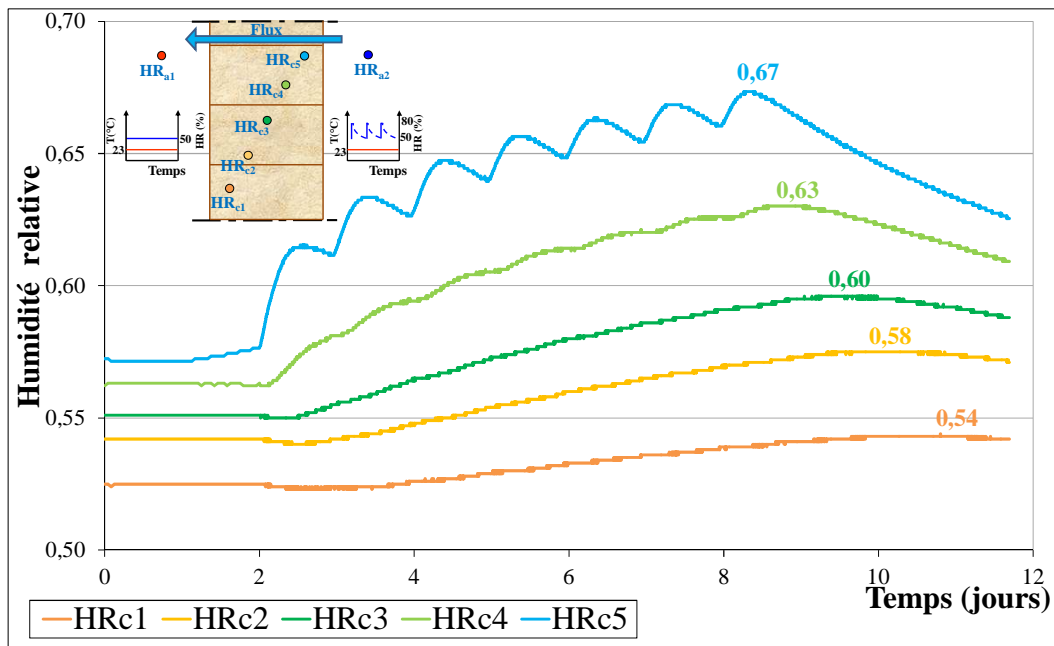


Figure V-16 : Profils d'humidité interne durant des chocs hydriques successifs

La réponse en température, Figure V-17, met en évidence une légère perturbation en surface de l'ordre de $0,3^{\circ}\text{C}$ qui s'estompe dans l'épaisseur. Il peut être conclu que le couplage thermo hydrique n'est pas directement lié aux amplitudes d'humidité mais aux vitesses de variations hydriques.

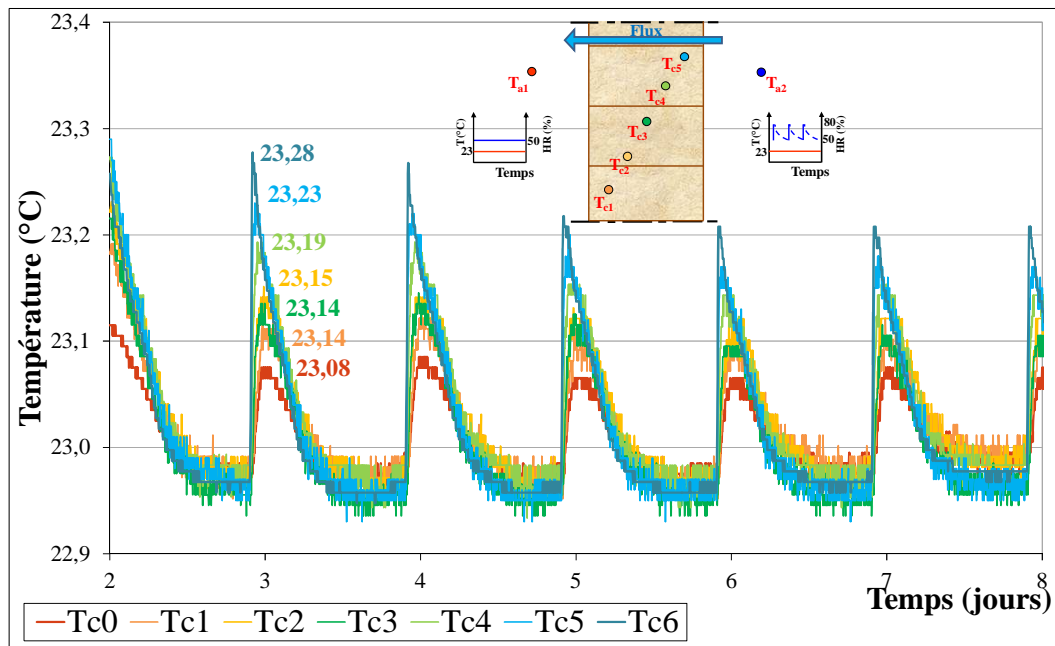


Figure V-17 : Profils de températures durant des chocs hydriques successifs

3. Modélisation numérique

La modélisation numérique des essais expérimentaux précédents s'appuie sur une simulation par éléments finis (Cast3M).

3-1. Maillage et conditions aux limites

Afin de limiter les temps de calcul induit, d'une part, par la forme incrémentale de la résolution et des boucles de convergence entre la résolution thermique et hydrique, la discrétisation spatiale, tout étant tridimensionnelle, est consacrée à une bande de mur, de 10 mm² de surface, Figure V-18.

En termes de conditions aux limites, les températures et humidités relatives respectives des deux chambres sont imposées via les échanges convectifs thermiques et hydriques. Le long des quatre autres faces (dans l'épaisseur de la paroi), les flux thermiques et hydriques sortants sont nuls.

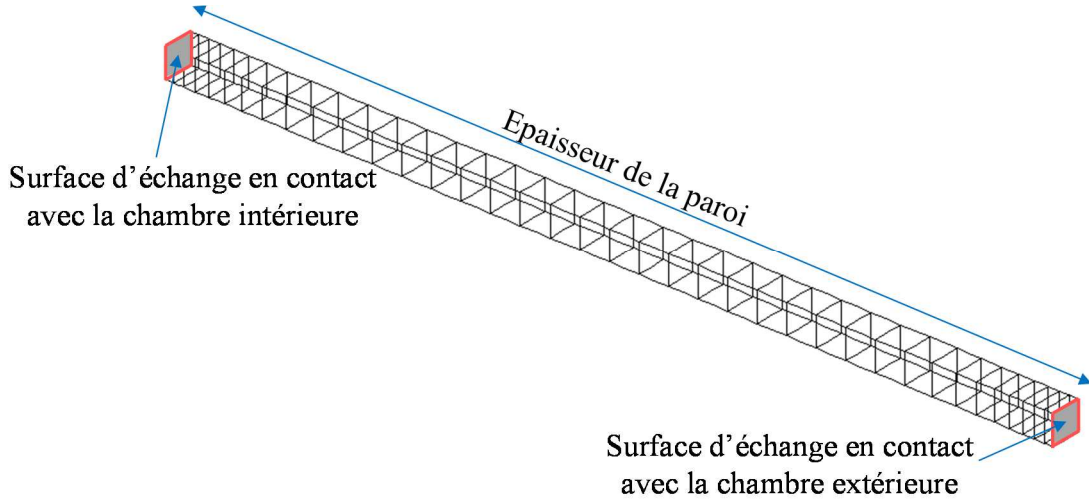


Figure V-18 : Maillage éléments finis d'une bande de la paroi

3-2. Implémentation éléments finis

L'implémentation des équations de transfert de chaleur et de masse est effectuée dans le code aux éléments finis Cast3M en détournant la procédure translin développée pour le transfert de chaleur non linéaire permettant de résoudre, de façon incrémentale, l'équation aux dérivées partielles :

$$a(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \vec{\nabla} (b(T) \cdot \vec{\nabla} T) + Q \quad (V.1)$$

Ainsi, cet algorithme incrémental est employé pour résoudre l'équation de transfert de chaleur rappelée ci-dessous :

$$\rho \cdot C \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + H_s \cdot \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \cdot \frac{\partial (H_v \cdot P_{vs})}{\partial x} \right) \quad (V.2)$$

L'équation de transfert de masse s'écrit :

$$\rho_s \cdot \frac{\partial \omega}{\partial HR} \cdot \frac{\partial HR}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \cdot \frac{\partial (HR \cdot P_{vs})}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\delta \cdot HR \cdot \frac{\partial P_{vs}}{\partial x} \right) \quad (V.3)$$

L'aspect non linéaire du comportement (tous les paramètres dépendant de la température et de l'humidité) nécessite de programmer une boucle de convergence entre les deux résolutions, et ce, dans chaque pas de temps. Egalement, afin d'optimiser les paramètres matériaux introduits dans le modèle, un algorithme simplexe a permis de minimiser l'écart entre modèle et résultats expérimentaux. Ce travail d'optimisation s'est opéré sur la phase de séchage du mur.

3-3. Optimisation du modèle

Dans un premier temps, les résultats de cette optimisation sont présentés en termes de profils d'humidité, Figure V-19, et de température, Figure V-20. Par symétrie du problème, seules les données issues des capteurs c_1 , c_2 et c_3 sont montrées en premier lieu. Les résultats de simulation sont encourageants car les différences enregistrées entre le modèle et les profils expérimentaux sont en dessous des précisions de mesure données par les capteurs. Les profils hydriques ont permis d'optimiser, d'une part, les propriétés de perméabilité à la vapeur, les échanges hydriques en surface par convection et l'isotherme de désorption.

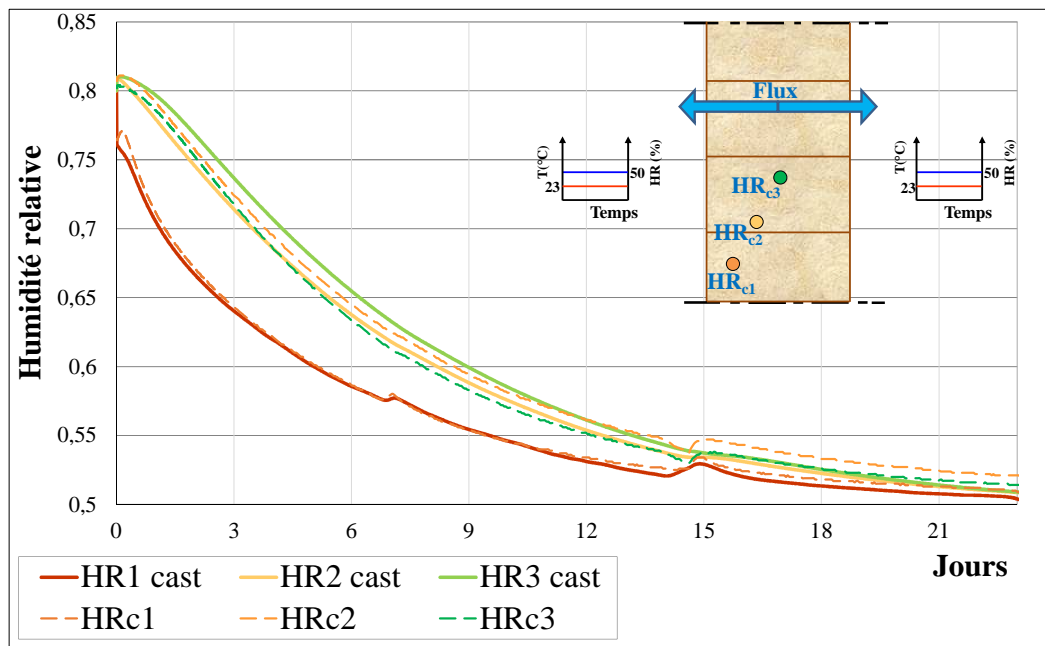


Figure V-19 : Profils hydriques en séchage, comparaison modèle et expérience

L'optimisation sur les profils de température permet de valider les valeurs de conductivité et de capacité thermique de la terre crue ainsi que la chaleur de sorption qui représente la principale variable de couplage entre le transfert de masse et de chaleur (valeurs issues de la caractérisation expérimentale). Les résultats montrent une différence inférieure à $0,1^{\circ}\text{C}$. La Figure V-20 compare les données mesurées (lignes en pointillé) et les valeurs calculées (lignes continues).

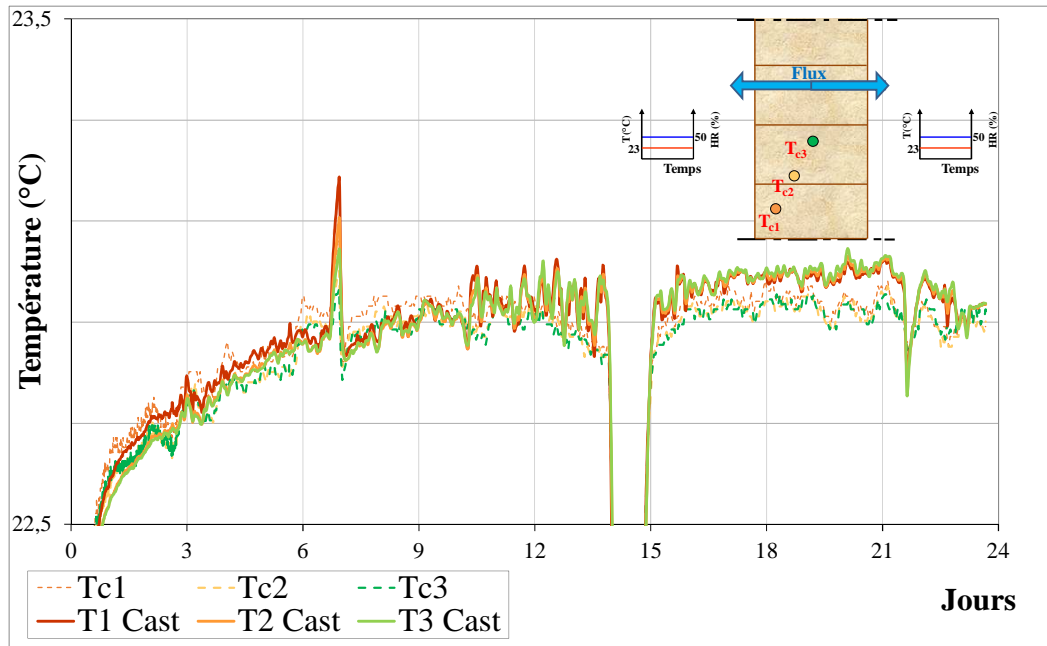


Figure V-20 : Profils de température en séchage, comparaison modèle et expérience

3-3-1. Perméabilité à la vapeur d'eau

L'algorithme d'optimisation donne une perméabilité à la vapeur fonction de l'humidité interne égale à :

$$\delta(w) = \delta_o \cdot \exp(k \cdot w) \quad (V.4)$$

A l'échelle de la paroi, δ_o est égale à $9,9563 \cdot 10^{-12}$ ($7,48 \cdot 10^{-12}$ à l'échelle matériau). De même, k est égale à 68,4 (76,3 à l'échelle matériau). Le graphique proposé en Figure IV-21 met en évidence les résultats.

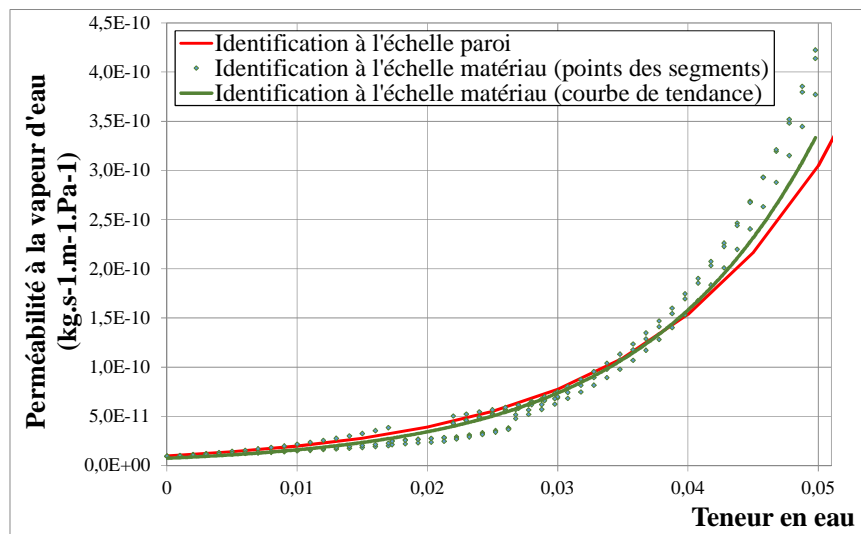


Figure V-21 : Perméabilités à l'échelle matériau et paroi (simplexe)

3-3-2. Chaleur de sorption

La chaleur de sorption représente la quantité de chaleur sensible et latente de vaporisation de l'eau. Il est opté pour la forme suivante :

$$H_s = 2500 + A_s \cdot \ln\left(\frac{w}{w_s}\right) \text{ avec } w \leq w_s \quad (\text{V.5})$$

Au-delà de l'humidité saturante w_s , un changement d'état liquide/vapeur d'eau libre avec une chaleur latente de 2500kJ/kg est considéré. En deçà de l'humidité saturante w_s , le changement d'état considère une vaporisation d'eau liée modifiant ainsi l'équilibre thermodynamique. La méthode d'optimisation converge vers une valeur de $A_s = -108,5 \text{ kJ.kg}$.

3-3-3. Coefficients d'échanges surfaciques thermiques

Afin de contrôler convenablement les échanges de chaleur en surface, les coefficients d'échanges surfaciques entre la paroi et les deux chambres climatiques ont été d'abord définis. Cependant, il est proposé à la méthode d'optimisation de rechercher les valeurs optimales. Concernant l'échange avec la chambre intérieure, il est obtenu une valeur de 15,04 W/m²K contre 15,5 W/m²K en théorie. Concernant la chambre externe, l'optimisation donne une valeur de 17,7 W/m²K contre 16,4 W/m²K.

3-4. Modélisation phase gradient d'humidité relative 50-80 %HR

Pour la modélisation de la phase d'adsorption en chambre extérieure, les calculs intègrent la première phase de séchage. Cela permet, en outre, d'avoir les bonnes conditions initiales sur l'ensemble des champs thermiques et hydriques. Sur la base de l'optimisation précédente, le modèle est capable de prédire la réponse expérimentale.

Les Figures V-22 et V-23 comparent les données calculées et mesurées par les cinq capteurs. En évolution de l'humidité dans le mur, une bonne tendance de la simulation est observée avec un écart de l'expérimental inférieur à 5 %HR. Les profils de température mettent en évidence l'effet du gradient hydrique avec une élévation brutale de la température de 0,6 °C. Cela met bien en avant l'existence du couplage thermo hydrique. Egalement, les résultats montrent une très bonne prévision du comportement malgré les aléas expérimentaux dus aux maintenances répétées de l'enceinte bi-climatique.

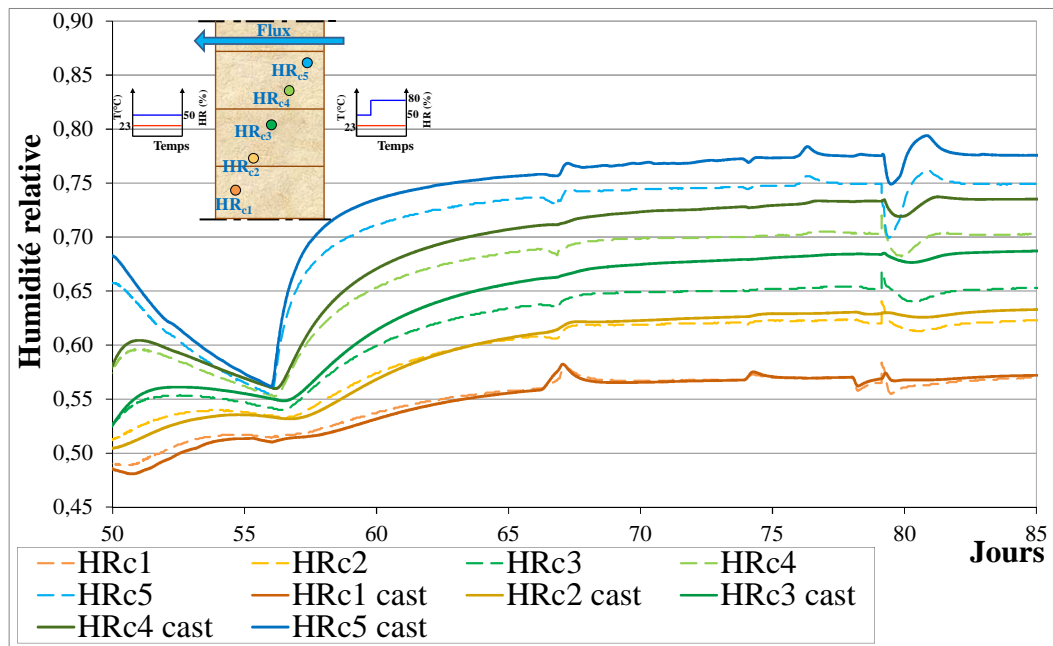


Figure V-22 : Profils hydriques mesurés et modélisés en phase d'adsorption

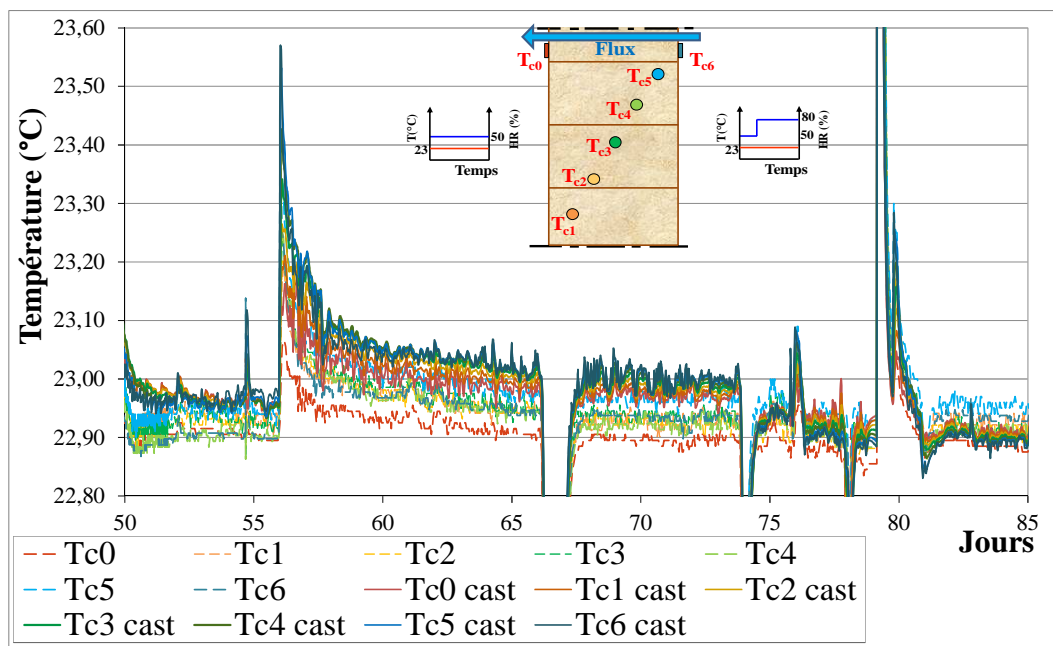


Figure V-23 : Profils thermiques mesurés et modélisés en phase d'adsorption

3-5. Modélisation phase créneaux multiples

La dernière simulation présentée ci-après concerne la sollicitation par créneaux multiples d'humidité relative imposée dans l'enceinte extérieure. Comme indiqué dans les paragraphes précédents, les créneaux sont effectués par des sauts hydriques. Le premier à 90 % HR d'une demi-heure suivi d'un régime libre durant 6 jours, puis une stabilisation à 50% HR. Les derniers

sauts sont successif à 80%HR avec un pallier de 30 minutes, qui sont aussi suivis d'une interruption de régulation hydrique (régime libre). Les conditions aux limites, concernant la surface en contact de la chambre extérieure, correspondent à imposer la température de 23°C et l'humidité relative mesurée par le système de régulation de la double enceinte. Initialement, le mur a été stabilisé de nouveau à 50 %HR. En termes d'évolution de l'humidité relative dans la paroi, la Figure V-24 montre un bon comportement avec des écarts, à l'égard des relevés expérimentaux, inférieurs à 3 %HR. Ce résultat est largement satisfaisant lorsqu'on connaît la précision de mesure de l'humidité relative, quand celle-ci devient importante. Selon la Figure V-25, il en va du même pour les profils de température.

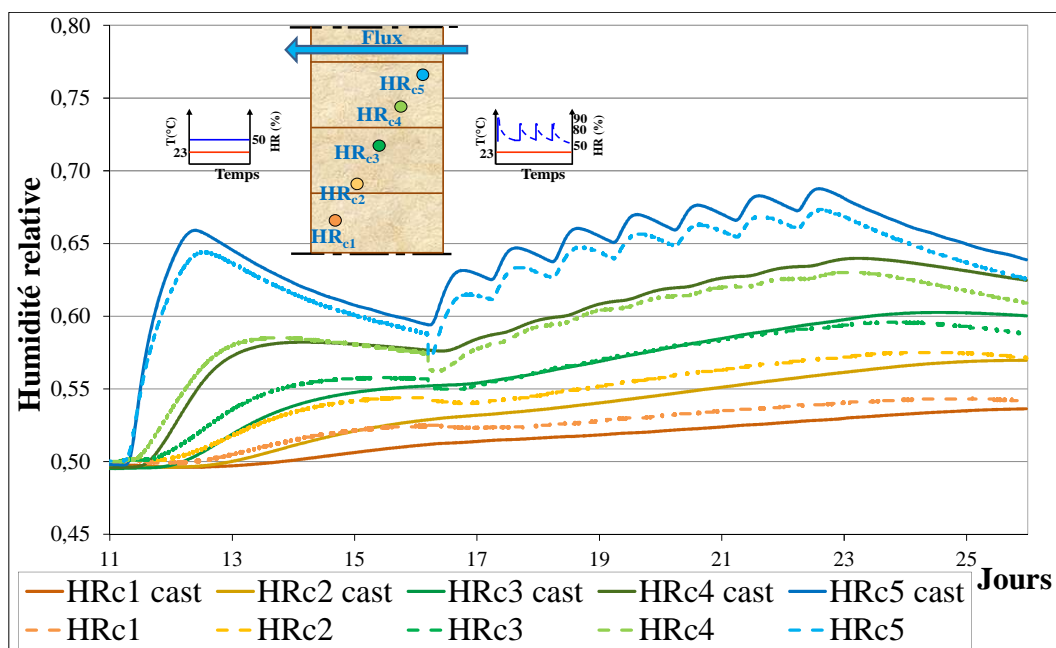


Figure V-24 : Profils hydriques mesurés et modélisés en phase sous créneaux

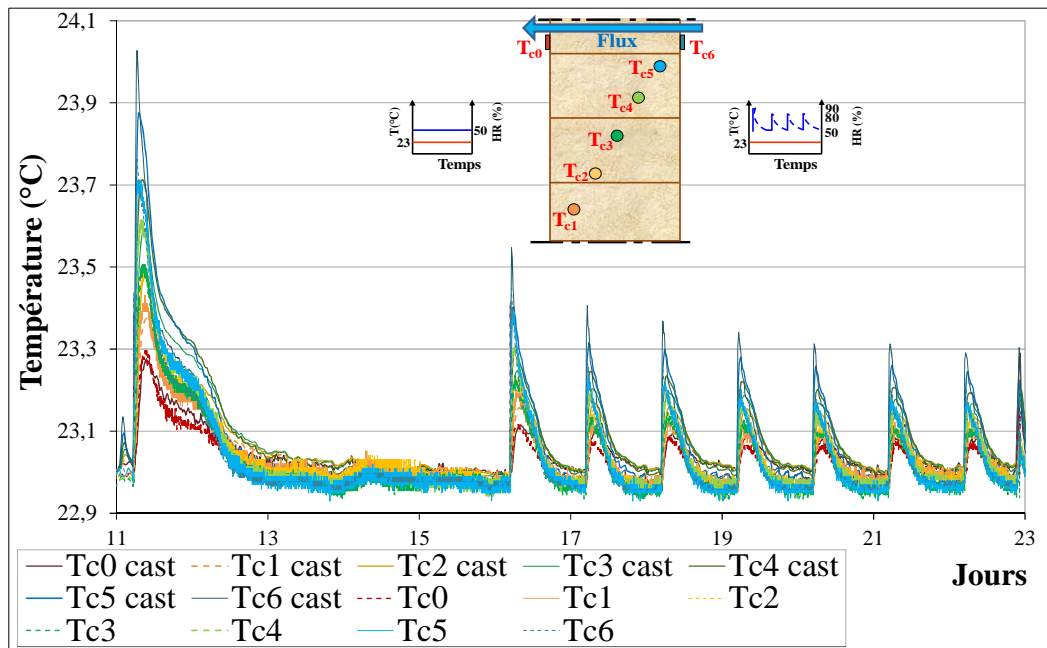


Figure V-25 : Profils thermiques mesurés et modélisés en phase sous créneaux

Conclusion

Le travail à cette échelle a conduit à développer, à la fois, une stratégie expérimentale et un modèle numérique global approuvant de caractériser le comportement thermo-hydrique d'une paroi en terre crue. L'utilisation d'une double enceinte climatique est une approche originale pour mettre en avant les effets du couplage entre flux de chaleur et transfert de masse. Egalement, l'utilisation d'un code aux éléments finis, bien que coûteux en temps de calcul, permet de prendre en compte l'ensemble des échanges énergétiques au cœur de la paroi.

Une approche par analyse inverse a permis de caractériser l'ensemble des paramètres modèle sur une première phase expérimentale. Les propriétés thermo hydriques calculées sont relativement proches des caractérisations à l'échelle du matériau. Ainsi, il peut être conclu que l'approche proposée est peu sensible aux effets d'échelle.

Dans des conditions isothermes externes, il a pu être mis en avant les effets du couplage hygro thermo sur la perturbation du régime stationnaire thermique. Il aurait été souhaité de faire un bilan plus poussé concernant les flux de chaleur et de masse. Cependant, le protocole expérimental et le chargement hydrique n'était pas caractéristique d'un climat extérieur, mais plutôt de conditions d'usage interne d'une pièce humide. C'est donc préférable de réserver cette étude sur des consommations énergétiques d'une enveloppe sollicitée par un climat réel.

Chapitre VI

Caractérisation thermo hydrique à l'échelle de l'enveloppe

« Dans notre effort de compréhension du monde qui nous entoure, les progrès les plus décisifs ne sont pas, contrairement à ce que l'on croit facilement, les réponses trouvées à nos questions, mais la formulation des questions plus pertinentes ou mieux posées. »

Albert Jacquard

Introduction

Une expérimentation à l'échelle de cellules-test extérieures présente plusieurs avantages par rapport aux autres échelles abordées précédemment.

Contrairement au cas des bâtiments habités, cette échelle permet de connaître avec précision les évolutions de charges internes, et de mettre en œuvre artificiellement les scénarios voulus. Il est possible de s'affranchir du facteur « occupant », toujours difficile à prévoir et à quantifier dans les bâtiments en service. D'autre part, à la différence de l'échelle paroi, les cellules-test ne nécessitent pas l'immobilisation d'un matériel coûteux tel qu'une double enceinte climatique. Il est alors possible d'effectuer des campagnes de mesure continues sur une ou plusieurs années, ce qui est indispensable dans l'étude des transferts hydriques au travers des parois. Donc, sous réserve que les conditions climatiques extérieures effectives soient intégrées avec soin, l'échelle de la cellule-test est celle qui semble la mieux adaptée pour confronter les modèles hygrothermiques avec l'expérience.

Ce dernier chapitre a pour objet d'identifier les mécanismes de transferts à l'échelle d'une zone interne d'enveloppe hygroscopique, et d'évaluer, sur plusieurs scénarios, les performances du modèle thermo hydrique couplé qui a été développé précédemment.

1. Protocole expérimental

Une campagne de mesures de plusieurs années (2008-2014) a été menée sur des cellules-test sur le site d'Egletons dans la Corrèze, à 650 m d'altitude : parmi elles, une cellule construite en rondins empilés (fuste), une autre en panneaux de béton de bois, (Figure VI-1). Les deux cellules-test ont été soumises aux aléas climatiques extérieurs réels (température, humidité, insolation, vent...). Dans ce qui suit ne seront présentés que les résultats relatifs à la cellule en béton de bois, en se focalisant sur la période 2011-2013. (Voir annexe-C pour les résultats concernant la fuste)

1-1. Présentation de la cellule-test en béton de bois

D'un volume intérieur 27 m^3 , la cellule-test a été réalisée sur ses 7 faces par des panneaux en béton de bois préfabriqués de 38 cm d'épaisseur (Figure III-2). Construite sur vide sanitaire ventilé, la cellule n'a d'ouverture qu'une seule porte doublée, disposée sur le pignon ouest. Une plaque de polystyrène extrudé de 70 mm a été disposée sur la face externe de la porte intérieure.

Les panneaux en toiture ont été étanchéifiés d'un pare-pluie et couverts d'une tôle en fibrociment avec un faîtage scellé au mortier chaux / ciment. Les murs extérieurs sont recouverts d'une fine couche d'enduit à la chaux. Dans un calcul réglementaire conventionnel, et d'après les propriétés identifiées au chapitre IV, les murs de cette cellule seraient caractérisés par un coefficient de transmission thermique $U=0,84 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ et une épaisseur d'air équivalente vis-à-vis de la diffusion de vapeur S_d de l'ordre de 2,5 m.



Figure VI-1 : Cellules-test béton de bois et fuste dans leur environnement

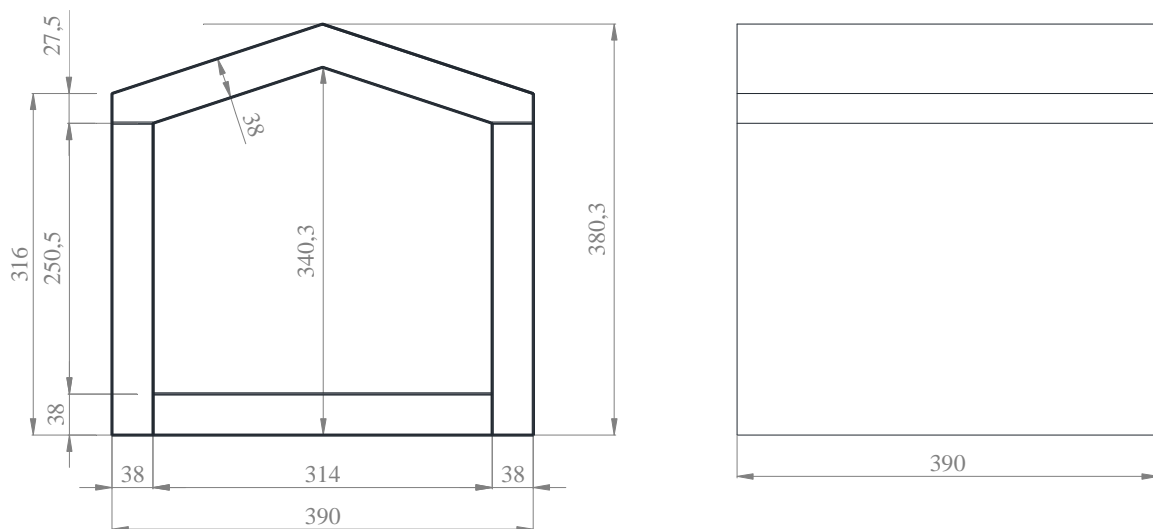


Figure VI-2 : Dimensions de la cellule-test béton de bois

Le système de chauffage est un panneau rayonnant électrique (Siemens) par effet Joule, d'une puissance de 1,5 kW. Il est disposé sur un socle, au centre de la cellule. Ce dernier est régulé en boucle fermée par son thermostat d'ambiance. Un ventilateur de brassage a été prévu permettant d'éviter la stratification thermique. Les quantités de vapeur déterminées par pesée ont été apportées à l'ambiance interne, soit par humidification adiabatique, soit par injection directe depuis une production extérieure à la cellule.

1-2. Instrumentation

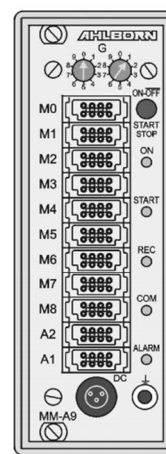
Pour les mesures des conditions météorologiques externes, une station météo a été placée sur un mât au-dessus du rondin faîtage de la fuste, Figure VI-2. Les paramètres prélevés sont les suivants :

- Température et humidité relative extérieures (prélevées sous abri) au moyen de capteurs capacitifs (FHA646 E1, Ahlborn). Le microprocesseur intégré dans le connecteur de la sonde permet également le calcul du point de rosée ($^{\circ}\text{C}$) et de l'humidité spécifique ($g_{\text{eau}} / kg_{\text{air sec}}$) ;
- Rayonnement solaire global par mesure du flux incident sur un plan horizontal (FLA613GS, Ahlborn) ;
- Vitesse du vent par un anémomètre à coupelles (FVA6152, Ahlborn) ;

Ces capteurs ont été raccordés à un module d'acquisition 2890-9 (Figure VI-3), qui mutualise les acquisitions météorologiques, Figure VI-3.



ALMEMO 2890-9
(Données météorologiques)



ALMEMO MA 8590-9
(Cellule-test béton de bois)

Figure VI-3 : Centrales d'acquisition (Source: www.wimesure.fr)

La figure VI-4 ci-après montre l'appareillage de mesure de la cellule-test. Les acquisitions des grandeurs mesurées ont été réalisées toutes les 15 minutes. Les instruments de la cellule-test en béton de bois ont effectué les enregistrements suivants :

- Température et humidité relative intérieures, (prises en parties basse et haute de l'ambiance), au moyen de capteurs capacitifs (FHA646 E1, Ahlborn).

- Énergie électrique nécessaire au système de chauffage et tout équipement mis en marche dans les locaux, évaluée par un wattmètre associé à un compteur d'impulsions : une impulsion pour chaque Wh consommé (compteur d'énergie TyWatt40 Delta-Dore + câble impulsions / cycles ZA9909AK2U, Ahlborn) ;
- Températures de surface au moyen des sondes de contact Pt100, disposées sur la surface interne et externe du mur, à 1m de hauteur sur la façade Sud et le pignon Est (Ahlborn FPA611). Le sabot en cuivre de chaque sonde a été encastré à fleur de paroi dans une petite anfractuosité, et scellé au mortier d'enduit.
- Température du matériau par sonde PT100 (Ahlborn FPA10L0100) introduite au cœur (à 100 mm de la face interne), par perçage puis rebouchage à la pâte de ciment ;

Les différents capteurs ont été raccordés à une centrale d'acquisition aveugle à 9 entrées « ALMEMO MA 8590-9 », disposant d'une mémoire de données EEPROM int. 512 ko de 1000.000 mesures. Le tableau VI-1 ci-dessous résume les caractéristiques de tous les capteurs utilisés.

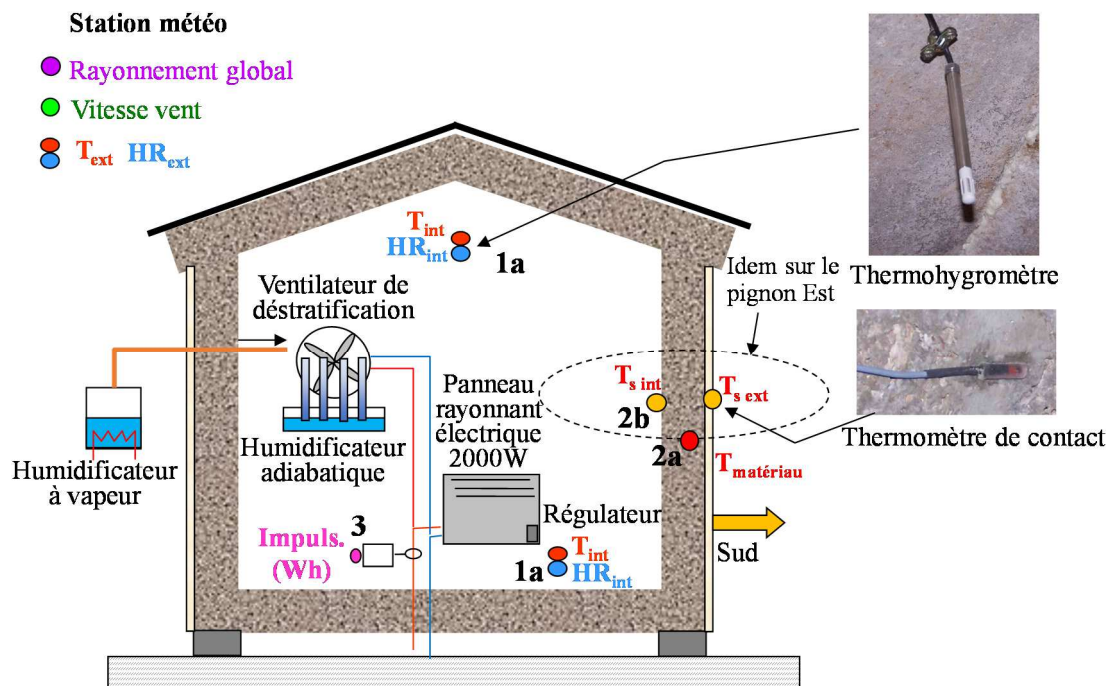








Figure VI-4 : Appareillage de la cellule-test béton de bois

Tableau VI-1 : Caractéristiques des capteurs de mesure utilisés dans la cellule-test

| <i>Repère</i> | <i>Type</i> | <i>Référence</i> | <i>Marque</i> | <i>Plage</i> | <i>Précision</i> |
|---|-----------------------------------|-----------------------|-----------------------|------------------------------|--|
|  1a-1b | Thermo-hygromètre | FHA646E1 | Wimesure (ex-Ahlborn) | 0 – 100% | ± 2% de HR dans la plage < 90% HR à T nominale |
| | | | | -20 à+ 80°C | -20 à 0°C : ±0.4 °C 0 à 70°C : ±0.1°C 70 à 80°C: ±0.6 °C |
| | | | | -200°C à +600°C | ± 0.3K |
|  2a | Sonde PT100 l=100mm câble 1.5m | FPA10L0100 | Wimesure (ex-Ahlborn) | -200°C à +600°C | ± 0.3K |
|  2b | Sonde de contact PT100 | FPA611 | | -10 à+ 90°C | ± 0.3K |
|  3 | Wattmètre | TYWatt 40 | Delta-Dore | 0 à 65 000 impulsions | 1 impulsion (1Wh) |
| | Compteur d'impulsion | ZA9909AK2U | Wimesure | | |
|  4 | Sonde de rayonnement global | FLA613GS | Wimesure (ex-Ahlborn) | 400 à 1100 nm -20 à+ 60°C | <10% à température nominale -20°C ±2°C |
|  5 | Anémomètre à coupelles, câble 12m | FVA6152 | | 0,5 à 50 m/s | ± 0.5 m/s |
| Modules d'acquisition de données aveugles (9 entrées mesures) | | MA85909 ALMEMO 8590-9 | | - | - |
| Option S : Mémoire EEPROM 512 KB, 100000 points de mesure | | OA8590S | | - | - |
| Câble interface USB/Almemo l=1.5m | | ZA1919DKU | | - | - |
| | | | | - | - |

1-3. Présentation synthétique du programme expérimental

Durant les trois années sur lesquelles porte l'étude, la cellule a été soumise à diverses séquences de longue durée en matière de chauffage et d'humidification interne (notées A, B, C...). D'autres évènements plus ponctuels sont également à mentionner (notés a1, a2, b1...). Ces séquences et évènements sont schématisés à la figure VI-5, qui présente l'évolution des valeurs journalières moyennes. Les conditions correspondantes sont données dans le tableau VI-2.

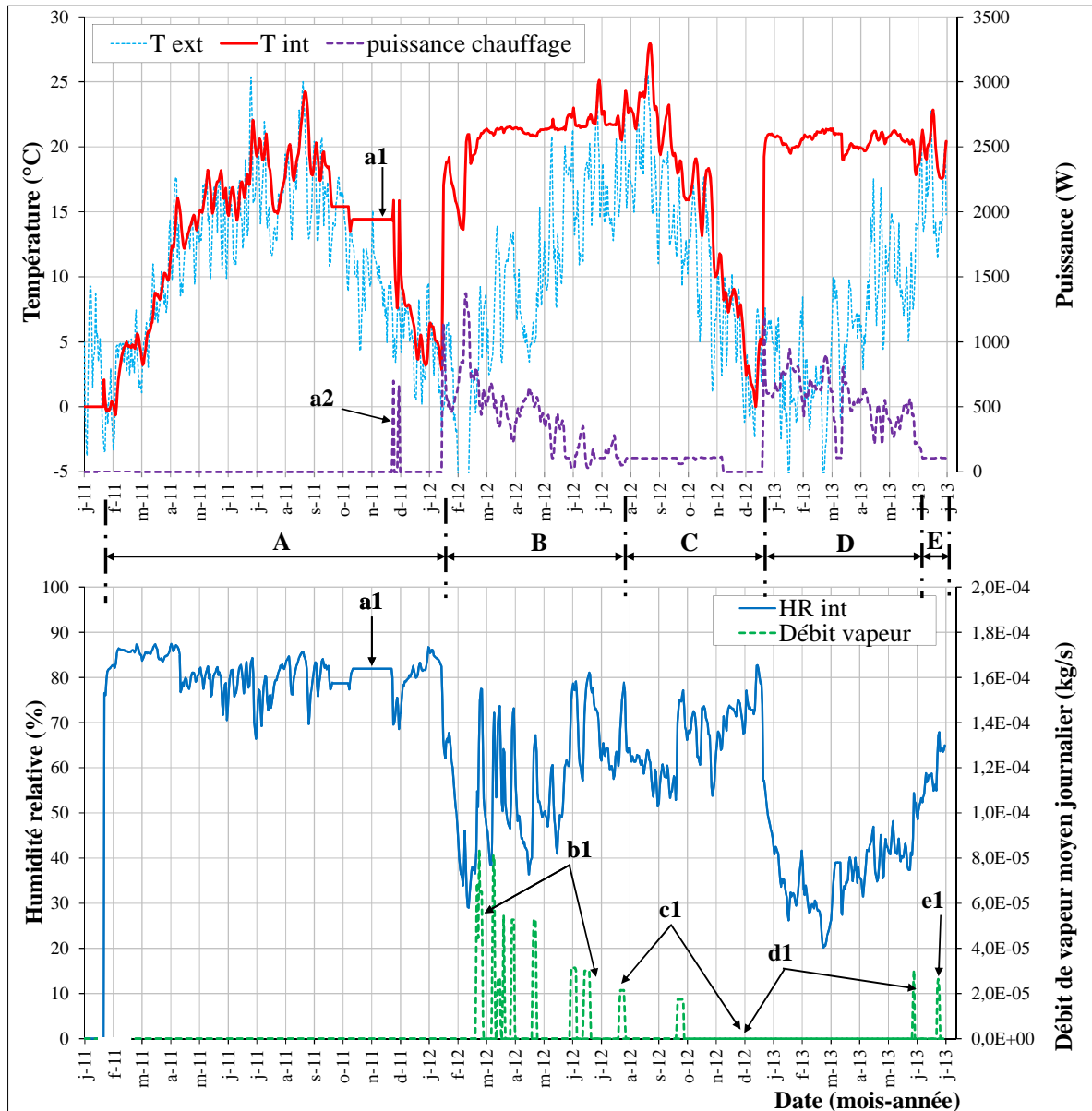


Figure VI-5 : Valeurs journalières moyennes mesurées durant la période d'étude

Tableau VI-2 : Caractéristiques détaillées des séquences expérimentales

| Séquence | Chauffage | Ventilateur | Evènements |
|------------------------------|-----------|-------------------------------|--|
| A 21/1/11 16/1/12 | non | non | a1 : défaillance chaîne d'acquisition a2 : 2 jours de chauffage, à 5 jours d'intervalle |
| B 16/01/12 22/7/12 | oui | oui | b1 : série d'humidifications adiabatiques (total : 142 kg) |
| C 22/7/12 20/12/12 | non | oui (→ 08/11) non (08/11→) | c1 : 2 humidifications adiabatiques (11kg chacune) |
| D 20/12/12 07/6/13 | oui | oui | d1 : 2 injections de vapeur (total : 4,49 kg) |
| E 07/6/13 03/7/13 | non | oui | e1 : 3 injections de vapeur, 3 jours consécutifs (total : 5,78 kg) |

Chacune de ces séquences va permettre la mise en évidence de divers comportements, en fonction des conditions et des phénomènes mis en jeu. La mesure sera à chaque fois confrontée aux résultats du modèle.

2. Modélisation par éléments finis

Comme cela a été présenté au chapitre III (Figure III-10), le modèle EF développé permettrait la modélisation géométrique tridimensionnelle directe de la cellule-test. Le principe de cette option a été testé avec succès. Toutefois, la modélisation complète du bâtiment, compte tenu de la finesse de discrétisation minimale requise, implique un nombre d'éléments qui n'est pas compatible avec des temps de résolution raisonnables.

La modélisation géométrique simplifiée qui a été retenue repose sur l'hypothèse que chaque paroi est traversée par des flux thermiques et hydriques unidirectionnels, perpendiculaires au plan de la paroi, et uniformes sur toute la surface. L'influence des ponts thermiques correspondant aux angles et coins est donc négligée. Cette hypothèse permet de simplifier le modèle géométrique, en représentant chacune des parois par un prisme constitué d'un empilement de parallélépipèdes dans la direction de son épaisseur (Figure VI-6).

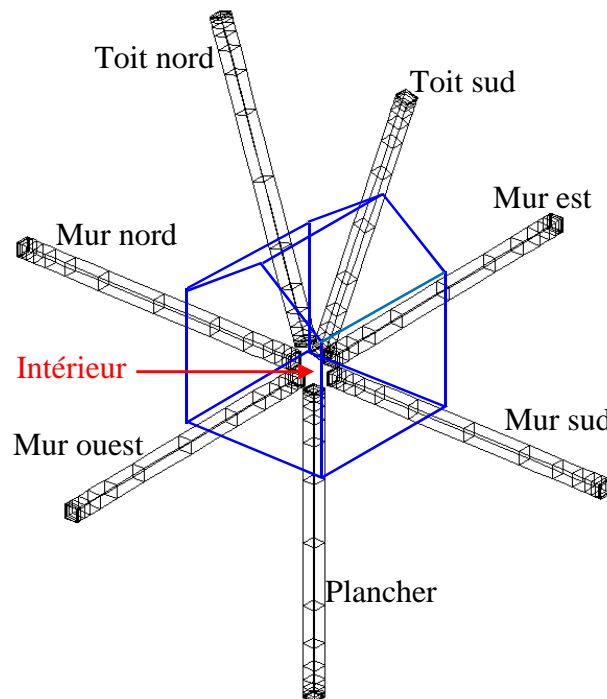


Figure VI-6 : Modèle géométrique de la cellule-test béton de bois

Les directions des prismes, qui correspondent à celles des normales aux parois, sont orientées dès la conception du maillage. Le choix de la section des prismes est arbitraire, mais s'effectue de manière à respecter un compromis entre l'élancement des éléments les plus épais au centre de la paroi (forme de bâtonnet), et l'écrasement des éléments les plus minces situés près des surfaces externes (forme de plaquette). Les surfaces réelles des différentes parois ainsi que le volume interne de la zone sont nécessairement des paramètres d'entrée complémentaires dont la valeur doit être explicitement donnée, car ils ne peuvent être déduits du modèle géométrique.

Les conditions aux limites extérieures proviennent de fichiers d'enregistrements climatiques. Ne disposant pas de sonde de rayonnement permettant de séparer les composantes directe et diffuse du rayonnement solaire global, le rayonnement solaire direct normal φ_{dirn} et diffus horizontal φ_{difh} , sont déduits d'une comparaison entre le flux global horizontal mesuré G_h et sa valeur théorique hors atmosphère [Reindl, 1990]. A partir de φ_{dirn} et φ_{difh} , les flux solaires absorbés sur chaque paroi sont automatiquement calculés en fonction de son azimut, son inclinaison, son coefficient d'absorption, et aussi de la date et l'heure.

Du côté intérieur, l'évolution des conditions hygrothermiques de l'air de la zone est calculée à chaque pas de temps en fonction du bilan des flux thermique et hydrique échangés sur la surface interne des parois, et des charges internes (chauffage et humidification). Ces charges proviennent également des fichiers d'enregistrements. Il est rappelé que le faible volant hydrique de l'air intérieur oblige à l'utilisation des pas de temps très faibles, de l'ordre de 60 secondes, afin d'éviter la divergence de l'algorithme.

Le tableau VI-3 présente la synthèse des données d'entrée du modèle. Les propriétés du matériau sont celles identifiées au chapitre IV. Les coefficients d'échange superficiel thermique sont empruntés aux règles Th-U de la RT2012.

Tableau VI-3 : Valeurs des paramètres d'entrée du modèle

| | Paroi | Epaisseur (m) | Aire (m ²) | Coef. absorpt. solaire |
|---|---|---------------|------------------------|------------------------|
| Modèle géométrique | Mur sud | 0,38 | 7,866 | 0,2 |
| | Mur nord | 0,38 | 7,866 | 0,2 |
| | Mur ouest | 0,38 | 7,02 | 0,2 |
| | Mur est | 0,38 | 8,679 | 0,2 |
| | Plancher | 0,38 | 9,859 | 0 |
| | Toiture sud | 0,38 | 5,190 | 0,6 |
| | Toiture nord | 0,38 | 5,190 | 0,6 |
| | Porte | | 1,659 | |
| | Volume intérieur zone : 27.254 m ³ | | | |
| Discrétisation | Epaisseur des éléments près de la surface : 1 mm Nombre d'éléments (cubes à 20 nœuds, CU20) : 18 par paroi, 126 au total Pas de temps : 900 s (CL intérieures imposées) 60 s (CL intérieures libres) Paramètre Theta-méthode : $\theta = 1$ (méthode implicite) | | | |
| Propriétés du matériau (béton de bois) | Masse volumique sèche : $\rho_s = 1212 \text{ kg/m}^3$ Chaleur spécifique sèche : $C_s = 953 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ Prise en compte des variations des propriétés ρ_h et C_h en fonction de w Chaleur de sorption : $H_s = 2500 \text{ kJ/kg}$ Isotherme de sorption : médiane à une branche (sans hystérésis) $w_s = 0,14 \quad \phi = 0,605 \quad a = 2,02$ Conductivité thermique : $\lambda = 0,2782 + 1,3444 \times w$ Perméabilité à la vapeur : $\delta = 2,19 \times 10^{-12} \times \exp(36 \times w)$ | | | |
| Echanges superficiels | Extérieur : $h_t = 25 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ $h_v = 1,87 \times 10^{-7} \text{ s.m}^{-1}$ Intérieur : $h_t = 10 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$ $h_v = 7,5 \times 10^{-8} \text{ s.m}^{-1}$ | | | |
| Conditions initiales | Variables en fonction du cas traité | | | |

3. Etude du comportement de la cellule-test en béton de bois

3-1. Séquence passive

La séquence A (année 2011 et début janvier 2012) (voir figure VI-5) correspond à un comportement passif, sans chauffage ni charges hydriques internes (si l'on exclut la semaine des deux créneaux de chauffage a2).

3-1-1. Analyse des mesures

Sur cette période, les températures moyennes sont de 11,2 °C à l'extérieur et de 12,5 °C à l'intérieur (hors la quinzaine de jours suivant le début des créneaux a2). Le faible écart entre

ces deux valeurs indique que les apports solaires sur cette cellule sont faibles, ce qui est logique compte tenu de l'absence de vitrages. Sur la même période, il est observé une grande stabilité de l'humidité relative intérieure, avec une valeur moyenne de 81,2%.

Sans chauffage, la cellule en béton de bois en hiver montre des températures très stables, mais aussi fraîches suite aux épisodes de temps froid. Une moyenne journalière de 4,3 °C a été enregistrée en hiver (Figure VI-7). Néanmoins, un écart maximal de 11,5 K a été noté entre la température intérieure et extérieure. Les températures surfaciques externes quant à elles atteignent les 25,6 et 12,7 °C, respectivement pour les orientations sud (TS Sud Ext) et est (TS Est Ext). Par contre, les températures surfaciques internes et celle prise dans le matériau, ne dépassent guère la température ambiante interne.

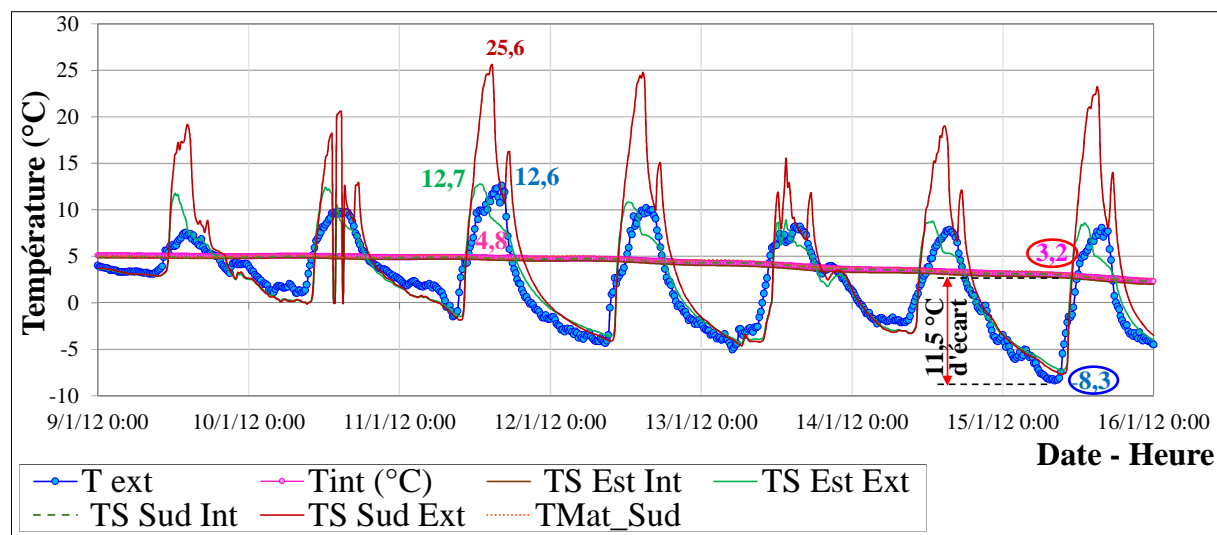


Figure VI-7 : Variation de la température intérieure, extérieure, surfacique et dans le matériau « béton de bois, semaine d'hiver »

En été, les sondes de contact disposées sur la surface interne des pignons Est et Sud (TS Est Int, TS Sud Int) dénotent des températures de surface étroitement proches de la température ambiante ce qui exclut l'effet de la paroi chaude en été. Or les températures surfaciques externes Est et Sud (TS Est Ext, TS Sud Ext) enregistrées atteignent 38,7 °C et 43,1 °C (Figure VI-8). Egalement la température du matériau prélevée à 100 mm de la face interne de la paroi sud (TMat Sud) est très proche de la température d'ambiance. Ces températures surfacique et dans le matériau témoignent la faible conductivité thermique du composite béton/bois, liée surtout à celle des copeaux de bois.

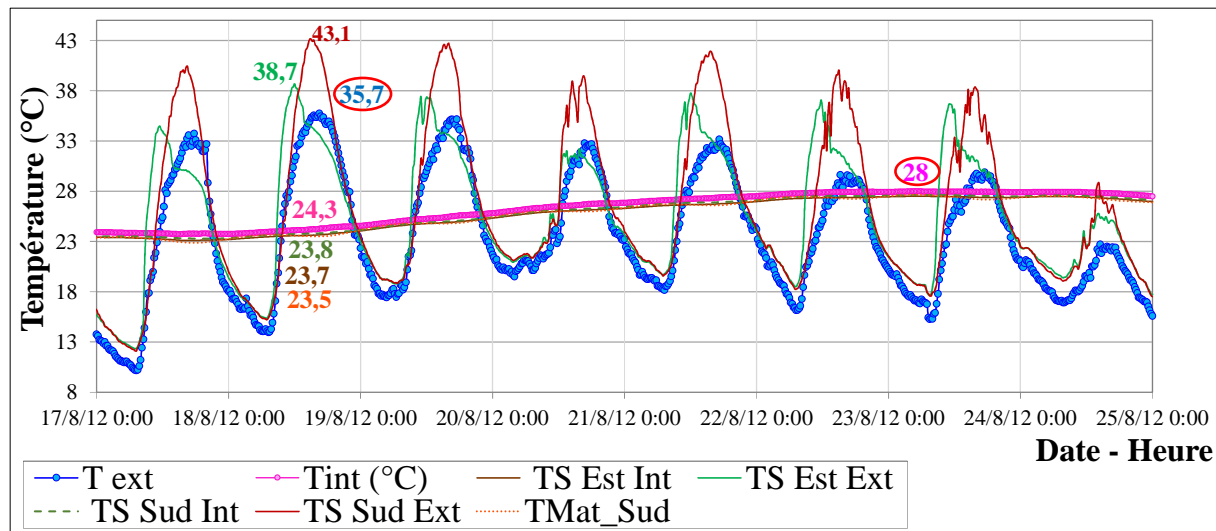


Figure VI-8 : Variation de la température intérieure, extérieure, surfacique et dans le matériau « béton de bois, semaine d'été »

3-1-2. Calcul des profils hygrothermiques dans les parois

Avant de procéder au calcul complet à l'échelle de l'enveloppe unizone, il peut être utile de déterminer les évolutions des profils hygrothermiques dans les sept parois. Ce calcul peut s'effectuer en prenant, comme conditions aux limites internes, les évolutions mesurées de la température et de l'humidité relative. Outre des informations sur les profondeurs de pénétration, ce calcul va fournir une base de données de profils régulièrement espacés, qui peuvent servir de conditions initiales pour des calculs complets unizones focalisés sur des périodes courtes. L'obtention des profils s'obtient avec un pas de temps de 900 s sans divergence, alors que le calcul de zone nécessite un pas maximal de 60 s à cause de la délicate équation de bilan du volume d'air intérieur. Pouvoir disposer de conditions initiales à un instant proche d'un créneau à calculer permet donc de gagner beaucoup de temps, et de s'affranchir d'une éventuelle dérive du modèle de zone.

L'examen des profils sur une année passive (Figure VI-9) montre que la profondeur de pénétration des variations hydriques sous l'effet des sollicitations annuelles externes n'excède pas 0,13 m. Ceci est vrai quelle que soit l'orientation de la paroi.

La figure VI-10 permet de visualiser une cartographie de la température dans l'épaisseur de chacune des parois, et ce, pour différentes heures d'une journée estivale caniculaire.

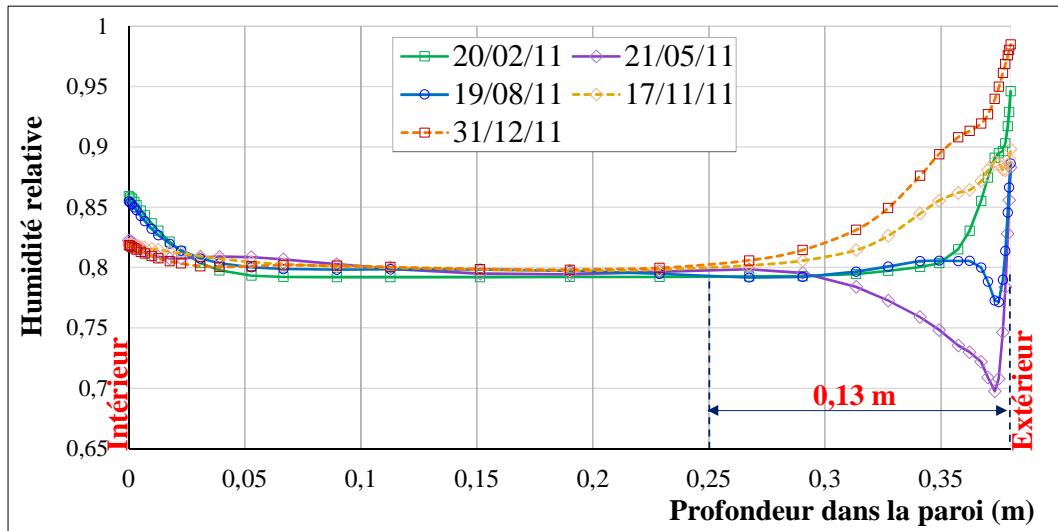


Figure VI-9 : Profils hydriques dans la paroi sud au cours d'une année passive

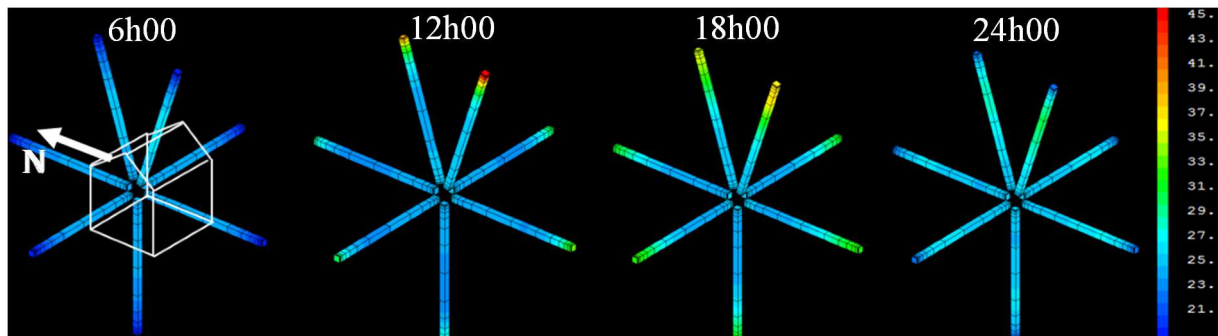


Figure VI-10 : Champ de température dans les parois (19/08/2012)

Les profils thermique et hydrique sont calculés pour cette journée du 19 août 2012, qui est l'une des plus chaudes, et qui présente une grande amplitude thermique jour/nuit. L'irradiation solaire est également très forte. La paroi choisie est le pan de toiture orienté au sud, qui est la surface la plus sollicitée par le rayonnement solaire, lequel sera en grande partie absorbé en raison de la teinte moyenne du toit (coefficient d'absorption de 0,6). Cette paroi et cette séquence donneront donc les réponses thermiques les plus intéressantes.

Les profils thermiques de la figure VI-11 montrent que la paroi de 38 cm amortit très efficacement les sollicitations thermiques externes journalières. Le gradient de température du côté interne ne change pas de signe, ce qui signifie que le flux de chaleur est entrant durant toute la journée. Ceci traduit bien une situation caniculaire, pour laquelle le refroidissement nocturne n'est pas suffisant pour inverser le sens du flux. Cet aspect est toutefois à relativiser, car le modèle ne tient actuellement pas compte du rayonnement grande longueur d'onde avec la voûte céleste.

La figure VI-12 montre des profils hydriques confondus sur la plus grande partie de l'épaisseur de la paroi. La profondeur de pénétration du signal hydrique externe journalier ne dépasse pas 2 cm. Cette figure est à rapprocher de la figure VI-9, qui présentait un phénomène analogue, pour des variations annuelles.

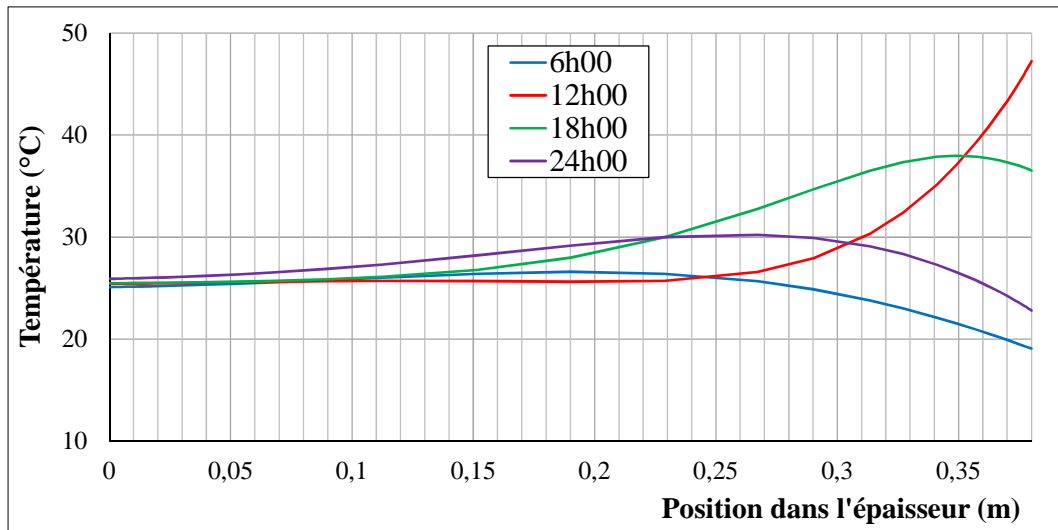


Figure VI-11 : Profils thermiques de la toiture sud, le 19 août 2012

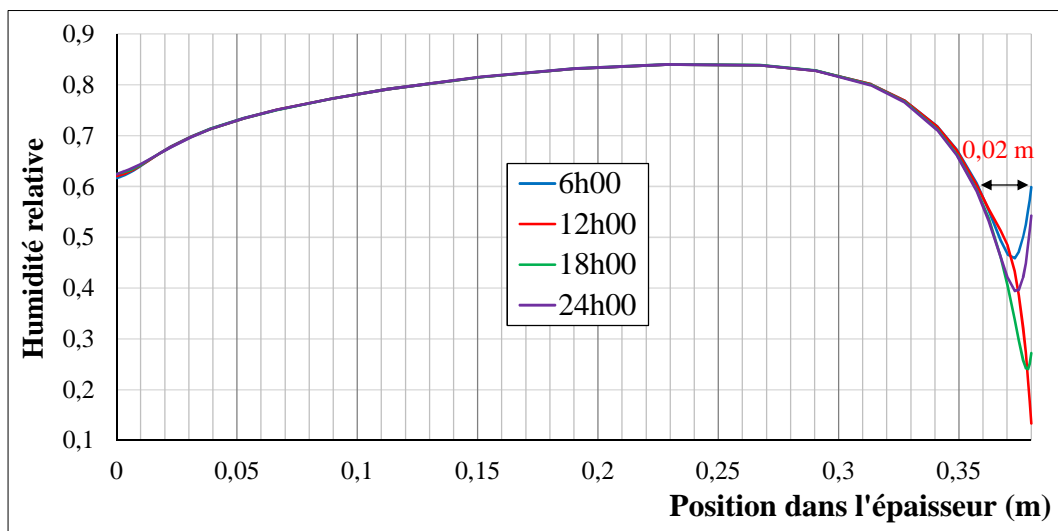


Figure VI-12 : Profils hydriques de la toiture sud, le 19 août 2012

3-1-3. Simulation hygrothermique unizone

Une séquence estivale présentant à la fois un bon ensoleillement et des variations significatives de température extérieure journalière moyenne a été choisie pour présenter un exemple de modélisation. La figure VI-13 montre un bon comportement du modèle en

thermique, avec une bonne adéquation entre les évolutions expérimentale et numérique de la température intérieure, comparé également aux simulations par TRNSYS. En revanche, l'humidité relative intérieure calculée reste pratiquement constante à 80%HR, alors que la mesure donne des fluctuations non négligeables autour de cette valeur, Figure VI-14. Ces écarts sont assez bien corrélés à l'écart de pression de vapeur entre les ambiances intérieure et extérieure, que l'on peut observer à la figure VI-15. Or cette différence peut être le moteur de migrations de vapeur d'eau dans l'air à travers les imperfections de l'enveloppe (joints entre panneaux préfabriqués, joints de porte...). Il est aussi possible que des transferts hydriques s'opèrent par advection, sous l'effet d'infiltrations d'air. Ceci amène à penser que la cellule-test présenterait des défauts d'étanchéité. Cet aspect sera un handicap pour les confrontations modèle/mesure qui vont suivre, car il est difficile d'avoir une estimation de ces débits de migration ou d'infiltration.

L'impact de la prise en compte ou non de la chaleur de sorption a été étudié par deux calculs : l'un avec $H_s = 2500$ kJ/kg, l'autre avec $H_s = 0$ kJ/kg. L'écart entre les courbes de température intérieure est infime, ce qui prouve que les mécanismes d'échanges hydriques intervenant sur la surface externe ne sont pas à même d'amortir l'effet des variations climatiques.

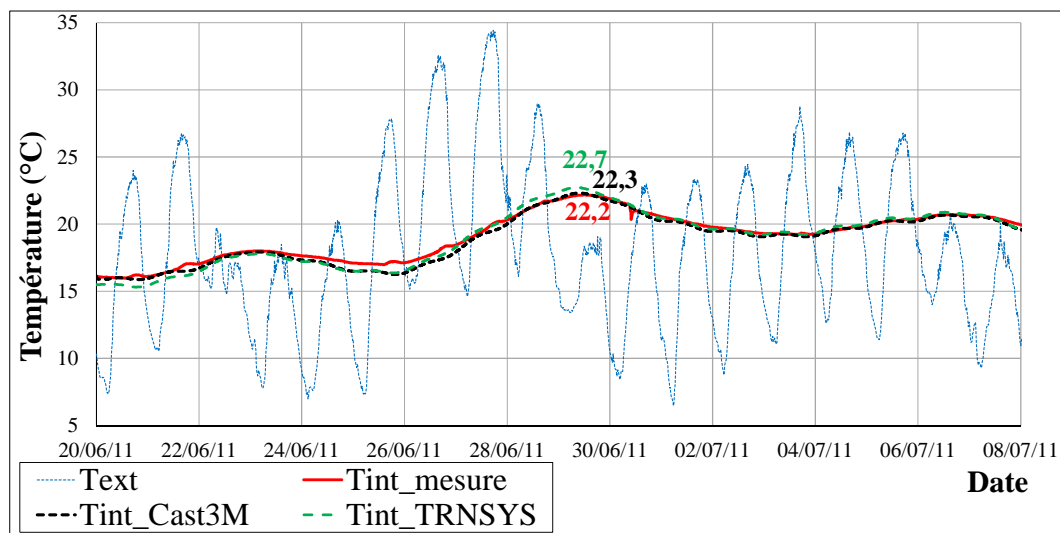


Figure VI-13 : Evolutions mesurée et calculée de la température de zone (période estivale)

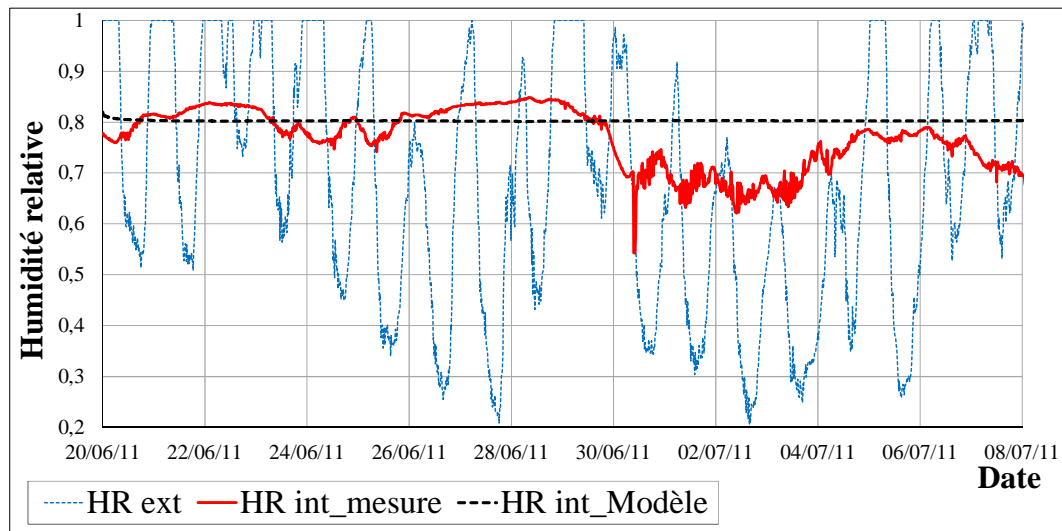


Figure VI-14: Evolutions mesurée et calculée de l'humidité relative de zone (période estivale)

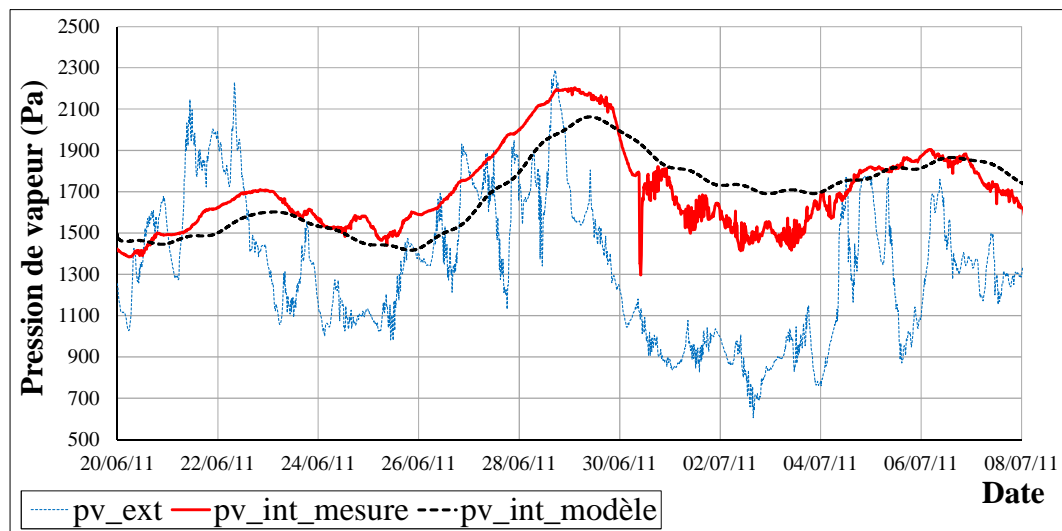


Figure VI-15 : Evolutions des pressions de vapeur intérieure et extérieure

3-2. Séquence de chauffage

La séquence D (fin 2012- début 2013) correspond à un comportement hivernal, avec chauffage et sans charges hydriques internes, Figure VI-5. La mise en route du chauffage, le 20/12/2012 permet de tester le comportement du modèle vis-à-vis d'un important régime thermique transitoire. La puissance du chauffage enregistrée est introduite dans le modèle comme charge thermique interne, et la comparaison porte sur la réponse en température intérieure.

La figure VI-16 montre un comportement cinétique correct du modèle, et ce, en phase transitoire. Par contre, la température d'équilibre atteinte par le modèle est inférieure d'environ 1,5 K à celle mesurée. Cet écart est préoccupant, et ses causes ne sont pas identifiées à ce jour. Certes, un dysfonctionnement de la chaîne d'acquisition météo entre le 21/12 et le 27/12 a privé la modélisation des apports solaires, qui ont été pris nuls par défaut, ce qui peut contribuer à la dérive initiale de température. Toutefois, à partir du 27/12, les courbes auraient logiquement dû se rejoindre. L'homogénéité de la température interne et la qualité de sa mesure ne peuvent être mises en cause, car la dé-stratification opérée par le ventilateur est efficace, avec des écarts inférieurs à 0,2 K entre les points haut et bas de la cellule. En facteur aggravant, les ponts thermiques et les infiltrations, qui n'ont pas été intégrés dans la modélisation, pourraient occasionner des écarts encore plus grands.

L'influence sur la température intérieure des modifications de propriétés (λ et δ) en fonction du taux d'humidité w est faible, mais visible (Figure VI-16, courbes « Tint mod. prop. constantes » et « Tint mod. prop. variables »). Par contre, l'effet sur la température intérieure du terme de chaleur de sorption H_s dans le couplage thermo-hydrique est infime, et n'a pas pu être montré graphiquement. Les résultats des deux calculs, avec ou sans prise en compte de H_s , donnent en effet des écarts de température qui n'excèdent pas 0,1 K.

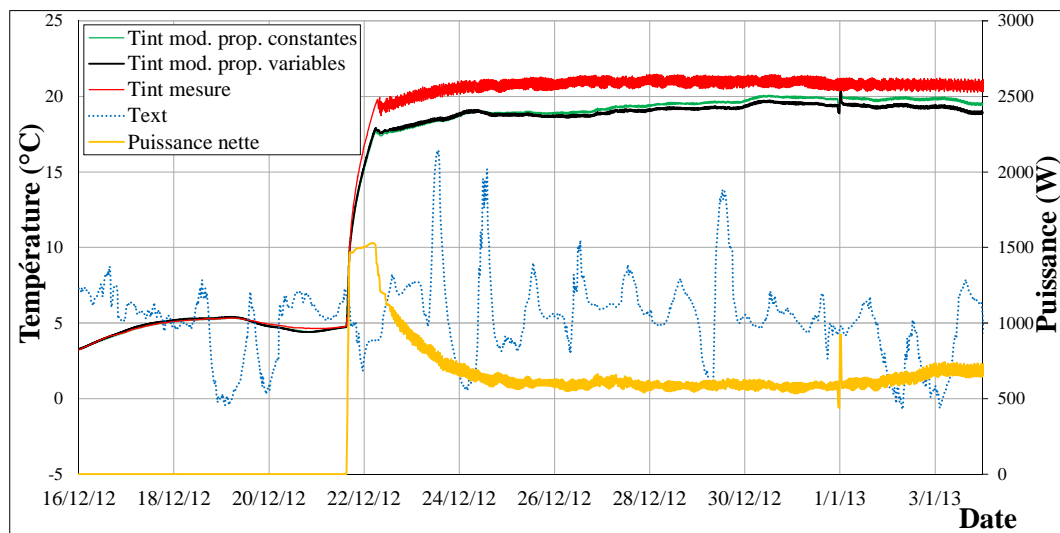


Figure VI-16 : Températures intérieures et puissance de chauffage (période hivernale)

Concernant l'humidité relative, le même phénomène que précédemment est constaté à la figure VI-17. Alors que le modèle donne une bonne stabilité lorsque la température de consigne est atteinte, la mesure révèle une baisse continue de l'humidité relative intérieure. La pression

de vapeur intérieure tend à s'équilibrer avec celle de l'extérieur, ce qui confirme l'hypothèse de fuites suggérée précédemment.

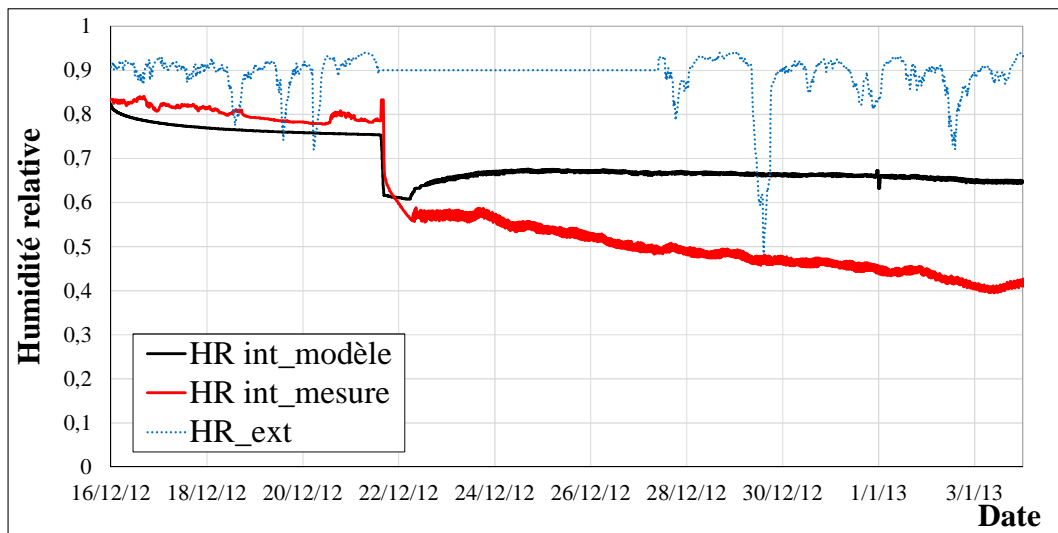


Figure VI-17 : Humidités relatives intérieures en période hivernale chauffée

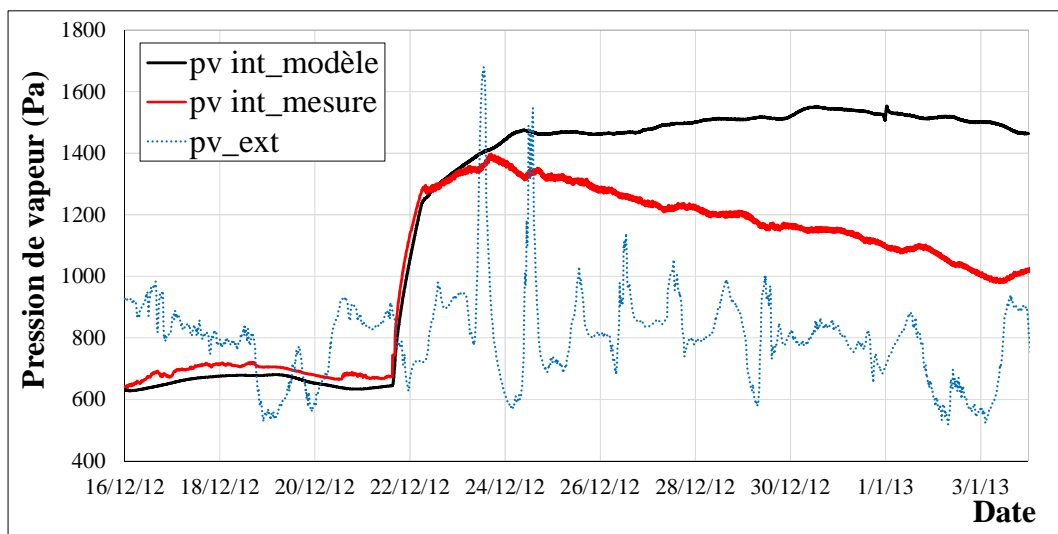


Figure VI-18 : Pressions de vapeur intérieures et extérieure

3-3. Séquences longues d'humidification

Dans la séquence B, Figure VI-5, ont été mises en œuvre huit phases de production de vapeur avec une masse totale d'eau évaporée de 142 kg, ceci en présence de chauffage. Le procédé utilisé est de type adiabatique : le ventilateur de dé-stratification souffle un flux d'air sur la surface libre d'eau contenue dans un bac, et parallèlement à des rangées de rideaux textiles trempant dans ce bac. L'eau remonte par capillarité le long des rideaux, ce qui permet

d'augmenter la surface d'échange et donc le débit d'évaporation. La masse d'eau introduite au départ est pesée. La durée d'humidification est facilement identifiable sur les enregistrements d'humidité relative intérieure. Les courbes présentent en effet un point de brisure très marqué à l'instant où toute l'eau est évaporée, Figure VI-19. En l'absence d'une pesée automatique continue du bac, il est retenu l'hypothèse d'un débit de production de vapeur constant durant toute la phase d'évaporation. En fonction des conditions, ce débit peut varier entre 0,1 et 0,3 kg/h. La charge thermique nette introduite dans le modèle est :

$$P_n = P_b - \dot{m}_v L \quad (\text{VI.1})$$

Avec :

P_b : puissance brute [W], qui comprend la puissance consommée par le radiateur et le ventilateur. C'est la valeur mesurée par le TyWatt.

\dot{m}_v : débit massique [kg/s] de vapeur produite par l'évaporation de l'eau du bac.

L : chaleur latente de vaporisation de l'eau égale à 2500 kJ/kg

P_n : représente donc la puissance effectivement communiquée à l'ambiance sous forme sensible, déduction faite de la puissance nécessaire pour assurer la vaporisation de l'eau.

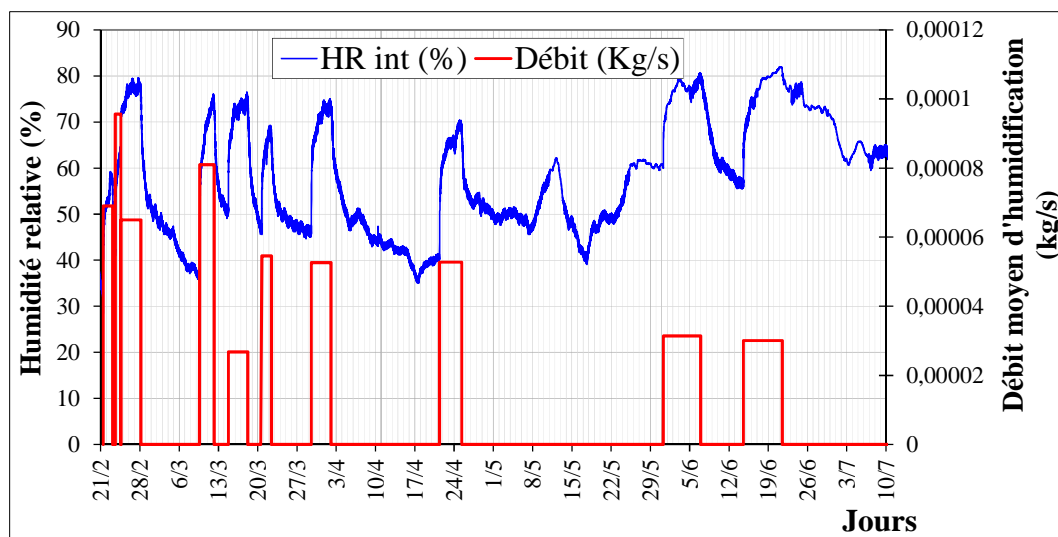


Figure VI-19 : Séquences d'humidification par évaporation d'eau

L'étude qui suit est focalisée sur le créneau d'humidification du 21/04 au 25/04, au cours duquel 18 kg de vapeur ont été produits. La figure VI-20 présente les évolutions d'humidité relative dans la cellule, sous l'effet du créneau d'humidification. Bien que les évolutions mesurée et modélisée présentent des similitudes, les courbes ne se superposent pas en raison des dérives dont la cause a été évoquée précédemment.

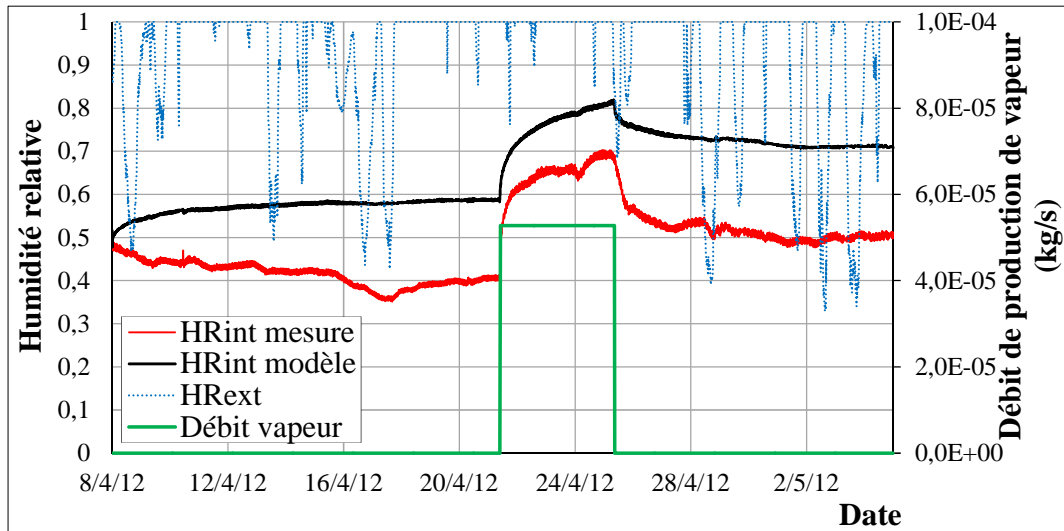


Figure VI-20 : Humidités relatives lors d'une séquence d'humidification adiabatique

L'influence de la chaleur de sorption est mise en évidence à la figure VI-21. Il apparaît clairement que sa non-prise en compte durant la phase d'adsorption par les parois éloigne le modèle de l'expérimental, et peut conduire à une sous-estimation de la température interne de l'ordre de 2K.

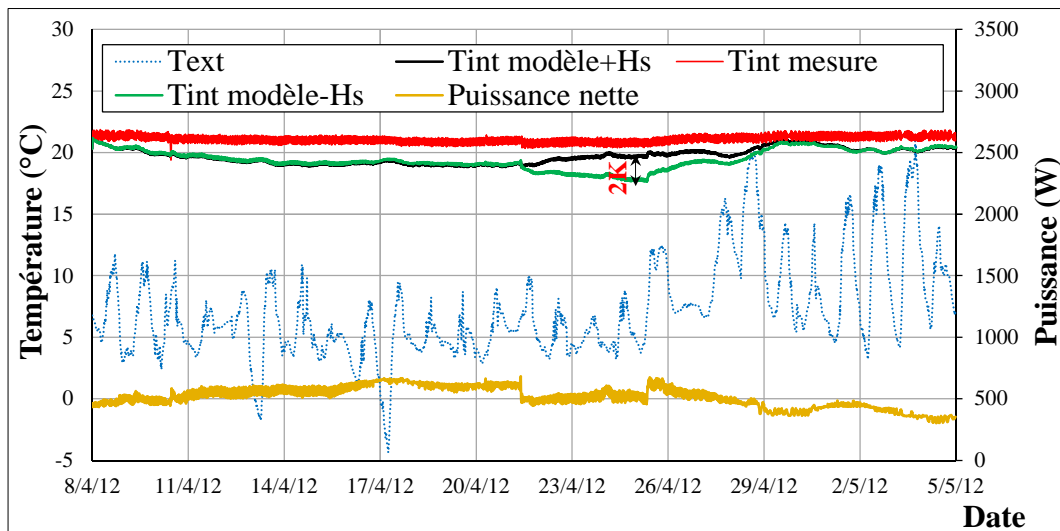


Figure VI-21 : Températures lors d'une séquence d'humidification adiabatique et effet de la chaleur de sorption

Ce dernier point montre à l'évidence que les charges hydriques internes produites par métabolisme ou processus peuvent être restituées sous forme de chaleur sensible lors de l'adsorption par les couches internes des parois hygroscopiques. Les logiciels classiques de

Simulation Thermique Dynamique, qui ne tiennent généralement pas compte de ce phénomène, délivrent donc une erreur par excès dans l'estimation des consommations. Le sens de modélisation choisi ici (puissance en entrée et température intérieure en sortie) ne permet pas de quantifier directement l'écart en termes d'énergie consommée. Toutefois, l'intégration de l'écart de température entre les deux modélisations sur la période perturbée, comparé à l'écart entre températures intérieure et extérieure, permet d'estimer des différences de l'ordre de 10% sur la consommation énergétique.

La figure VI-22 montre les résultats d'une simulation classique par TRNSYS, dans laquelle la température de consigne est prise égale à la température intérieure moyenne mesurée sur la période des humidifications. La réponse de TRNSYS en terme de puissance montre bien les écarts par rapport à la puissance nette mesurée, lors des périodes d'humidification, ce qui traduit qu'une approche de STD classique ne peut tenir compte de la récupération de la chaleur de sorption sous forme de chaleur sensible.

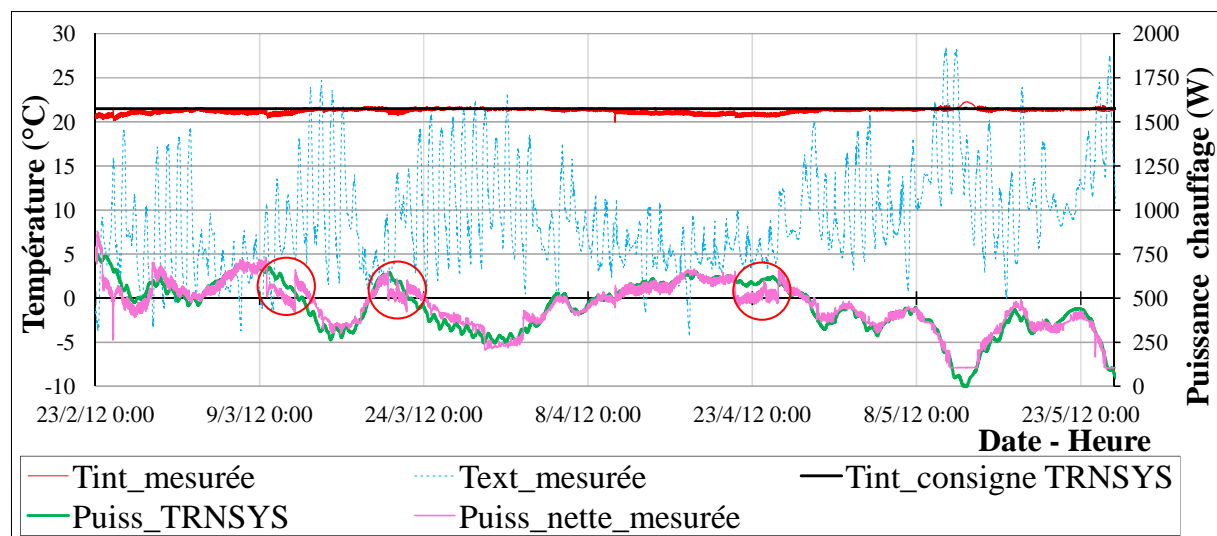


Figure VI-22 : Puissances lors de séquences d'humidification adiabatique : comparaison entre une modélisation TRNSYS et mesure

Il convient néanmoins de relativiser ces écarts, car la production de vapeur de 18 kg en 4 jours est beaucoup plus importante que ce qui peut être rencontré en réalité dans une habitation en service.

3-4. Evolution des profils hydriques à long terme

Il a été montré que les variations climatiques annuelles n'avaient que peu d'influence sur les profils hydriques en profondeur des parois. Ceci est encore plus vrai pour les variations journalières. Il peut être intéressant d'examiner s'il en est du même avec les variations de conditions intérieures, lorsque celles-ci sont conditionnées par des séquences longues de chauffage et d'humidification. Contrairement au mur en terre crue, évoqué au chapitre V, la cellule-test n'est pas équipée de capteurs permettant de mesurer ces profils, et il faudra s'en remettre au modèle pour obtenir cette information.

Nous rappelons les conditions pour la période étudiée. Les numéros ci-dessus se rapportent aux numéros de courbes de la figure VI-23 qui marquent la fin de la période :

- 1- Du 14/01/12 au 18/02/12 : chauffage
- 2- Du 18/02/12 au 28/04/12 : chauffage et apport de vapeur
- 3- Du 28/04/12 au 23/06/12 : chauffage faible et apports de vapeur ponctuels
- 4- Du 23/06/2012 au 15/12/12 : passif, et apports de vapeur ponctuels en juin
- 5- Du 15/12/12 au 30/03/13 : chauffage

Les séquences de chauffage (courbes en trait plein) se manifestent toujours par une diminution de l'humidité relative dans la paroi en profondeur, et concernent au moins la moitié intérieure du matériau. La période estivale conduit à une remontée de l'humidité relative, qui a pu être aussi favorisée par des séquences d'humidification. Le début d'hiver, en comportement passif, provoque une nette remontée d'humidité relative du côté intérieur.

L'absence de gradient hydrique à une abscisse située aux 2/3 extérieurs, et la faible évolution temporelle de l'humidité relative en ce point au cours d'une année, conduit à penser qu'il n'y a pas véritablement de transfert massique traversant la paroi, mais plutôt des échanges des deux côtés, avec les ambiances respectives.

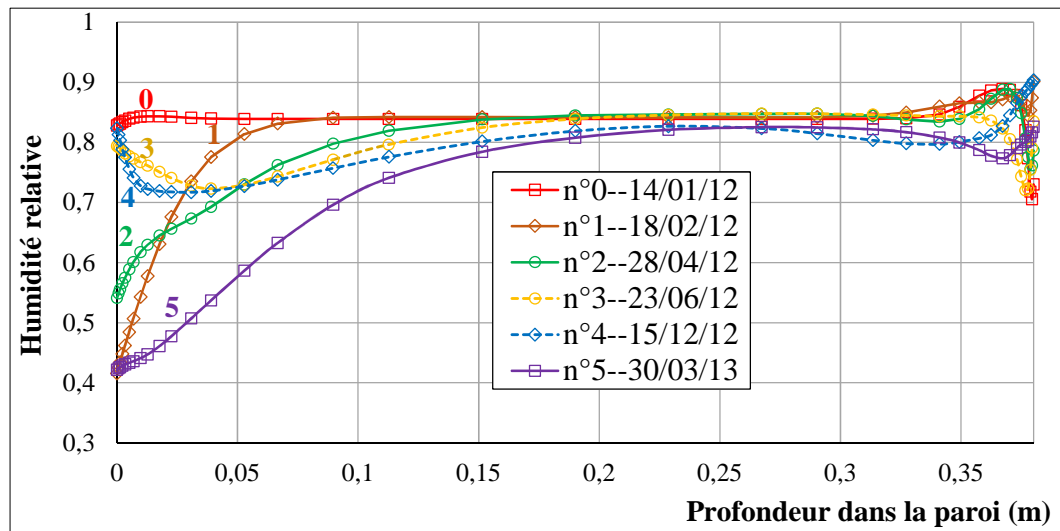


Figure VI-23 : Evolution à long terme des profils hydriques dans le mur sud

Dans l'étude inter-saisonnière des transferts hygrothermiques, le stockage profond peut donc jouer un rôle, et nécessite d'être intégré dans les modélisations.

3-5. Créneaux courts d'humidification

Lors de la séquence E, Figure VI-5, trois séquences d'injection de vapeur quasi-identiques ont été effectuées en période estivale passive à 24 h d'intervalle. Les quantités d'eau injectées sont de 2.000, 2.159 et 1.626 kg pour des durées d'injection respectives de 2h45, 2h50 et 2h20. La figure VI-24, présente la réponse en termes d'humidité relative mesurée dans la cellule. A la fin de chaque injection, celle-ci atteint un maximum de 90%, pour décroître immédiatement après. La courbe d'évolution montre l'effet de cumul de ces humidifications successives, avec un accroissement global de HR d'un cycle à l'autre. L'effet de la chaleur de sorption sur la température intérieure est clairement mis en évidence à la figure VI-25, avec, lors de chaque injection, un regain de température atteignant +1,3 K en moyenne sur les trois créneaux.

Cette séquence a été modélisée par éléments finis. Les enregistrements du climat extérieur et les quantités de vapeur ont été introduits comme données. Les charges thermiques internes ont également été prises en compte. Celles-ci comprennent la puissance consommée par le ventilateur de brassage, et la part de chaleur sensible correspondant à la quantité de vapeur injectée à 100 °C. Le modèle sous-estime d'environ un tiers l'amplitude de HR lors d'un cycle, par rapport à la réalité, ce qui reste problématique. En revanche, la réponse thermique du modèle

est relativement satisfaisante, avec des amplitudes de variation de la température qui sont du même ordre que celles mesurées.

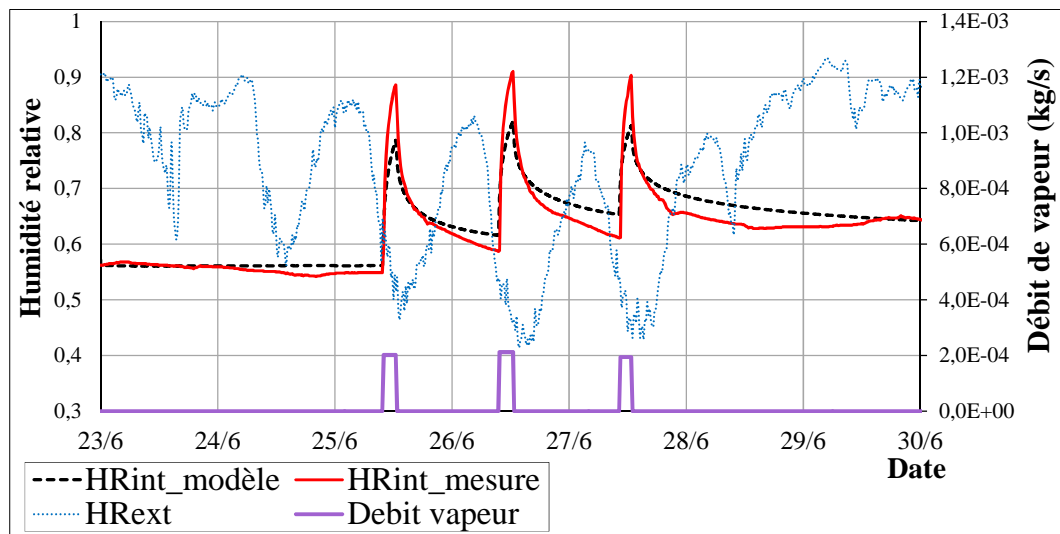


Figure VI-24 : Réponse hydrique à trois créneaux successifs d'injection de vapeur

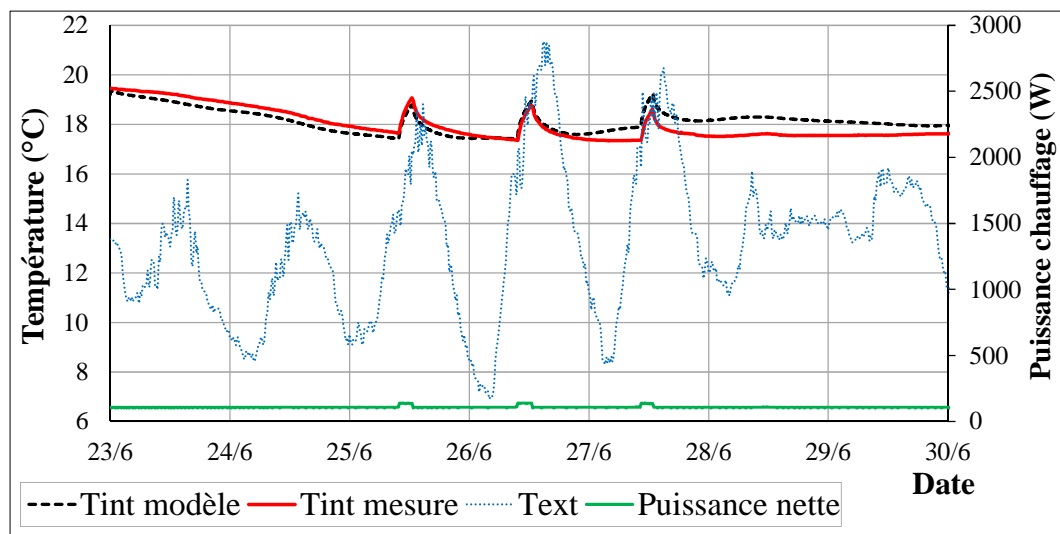


Figure VI-25 : Réponse thermique à trois créneaux successifs d'injection de vapeur

Conclusion:

L'approche de caractérisation thermo hydrique à l'échelle de l'enveloppe a consisté à soumettre une cellule-test aux aléas climatiques extérieurs, et à des apports enthalpiques et hydriques internes parfaitement maîtrisés. Sans mobilisation d'équipements coûteux, le monitoring de la cellule-test mise en service a permis le suivi des transferts à long terme et de

caractériser son comportement thermo hydrique dynamique à l'échelle de plusieurs années. Cette échelle a conduit de mettre le modèle à l'épreuve, en vue d'une application future à des bâtiments en service. La comparaison entre les réponses hydriques expérimentale et numérique a probablement été dégradée par l'existence de fuites. Il aurait été très facile d'introduire celles-ci dans les bilans du modèle, au même titre qu'un débit de renouvellement d'air. L'identification du débit de fuites, par minimisation d'écart entre les réponses hydriques calculées et mesurées, serait un prolongement intéressant.

Identiquement aux deux autres échelles abordées précédemment, l'échelle de la cellule-test a permis de mettre en évidence l'effet de la chaleur de sorption, cette fois-ci sur le comportement thermique de la zone. Force est de constater que, du moins pour le béton de bois, cet effet est visible, mais d'une ampleur limitée sur le bilan énergétique final. L'apport de la chaleur de sorption serait sans doute beaucoup moins marginal sur des enveloppes hygroscopiques performantes, compatibles avec les exigences de la réglementation actuelle, ce qui est loin d'être le cas de la cellule en béton de bois.

Conclusion générale

« Puisqu'on ne peut être universel en sachant tout ce qui se peut savoir sur tout, il faut savoir peu de tout, car il est bien plus beau de savoir quelque chose de tout que de savoir tout d'une chose. »

Blaise PASCAL

Dans ce travail de thèse, le comportement thermo hydrique des enveloppes hygroscopiques a été étudié via des approches expérimentales et numériques. L'objectif initial était de mettre en avant l'effet du transfert hydrique sur le comportement thermique de ces enveloppes en été et en période de chauffage. Plusieurs systèmes constructifs ont été suivis dans diverses typologies climatiques.

La première échelle de caractérisation a visé de mettre en place des monitorings sur des maisons habitées afin d'étudier les grandes tendances de comportement avec l'appui d'un logiciel de calcul de simulation thermique dynamique, et ce dans des climats très variés allant de l'Algérie, du sud-est subsaharien jusqu'à la Corrèze en France. Les difficultés rencontrées dans la compréhension du comportement des maisons ont été causées par des scénarios (utilisation des maisons) non contrôlés, des enveloppes comportant des faiblesses d'étanchéité et d'isolation ou des structures complexes. Le monitoring couplé à un calcul théorique a cependant assuré, sans quantifier les phénomènes, de mettre en avant une corrélation entre les matériaux utilisés vis-à-vis d'un climat bien identifié et le confort ressenti par les habitants. Si des déphasages et amortissements thermiques ont bien été relevés, cette approche ne pouvait pas satisfaire les scientifiques que nous sommes. Elle nous a conduit vers une démarche expérimentale et numérique qui est répartie sur des échelles inférieures : de celle du matériau, de la paroi et de la cellule-test, échelles intermédiaires graduelles avant l'échelle une. Pour chaque échelle, les objectifs scientifiques ont été bien ciblés afin de jouer la complémentarité. Cela que ce soit sur le terrain expérimental ou sur le développement et l'implémentation des simulations numériques. Egalement graduelles, ces dernières reposent sur un modèle de transfert de chaleur et de masse couplé.

A l'échelle centimétrique du matériau, une caractérisation expérimentale a été menée, adaptée au modèle numérique établi. Ainsi, de façons découplées, une méthode inverse a été développée afin de caractériser les propriétés intrinsèques de diffusion hydrique pour des matériaux divers tels que le béton de bois, la pierre de travertin, la terre crue ou le plâtre. Cette échelle a permis la caractérisation du processus de diffusion en y intégrant des comportements hydriques non linéaires ainsi que les isothermes de sorption caractérisant les matériaux hygroscopiques.

Les dimensions limitées des échantillons, à l'échelle du matériau, ainsi que les conditions expérimentales ne conduisent pas aisément, pour des questions de gradients limités d'humidité et de température, à mettre en avant les couplages entre les transferts de chaleur et de l'hydrique. L'échelle métrique du mur a conduit à mettre en place une stratégie expérimentale et numérique

afin de caractériser ce couplage. Limitée à une application terre crue, les effets thermodynamiques de changement d'état d'eau liée sur le régime thermique ont été caractérisés via l'approche proposée. Des chocs et des gradients hydriques ont aboutis à amplifier les phénomènes pour améliorer les résultats de caractérisation. Les différentes implémentations du modèle par différences et éléments finis ont mené, d'une part, à développer une méthode inverse de caractérisation et, d'autre part, de mettre en évidence ce couplage souvent suspecté mais rarement démontré. Cependant, cette étude a fait appel à une double enceinte climatique d'une utilisation lourde et dont les pannes ont été très fréquentes.

Une quatrième échelle a permis de tester les modèles sur des cellules-test. Il s'agit d'une échelle plus complémentaire car elle assure, sans instrumentation, d'avoir une sollicitation climatique réelle en y intégrant le rayonnement solaire ainsi que la convection hydrique et thermique réelles. Une généralisation du modèle 3D a été proposée, en intégrant un bilan hygrothermique de la zone interne. Pour des raisons de temps de calcul, une diminution d'ordre a cependant été nécessaire. Ainsi, un modèle 1D a été proposé. En complément des logiciels professionnels, notre approche consente une modélisation massive, nécessaire pour prendre en compte les couplages thermo hydriques. Dans ce travail, l'approche développée n'a été présentée que sur l'une des cellules test, celle en béton de bois. Les résultats du monitoring de la cellule en bois massif ont été développés en annexe. Il s'avère cependant que pour des sollicitations climatiques tempérées, les couplages sont d'un effet visible, mais d'ampleur limitée sur le comportement thermique global, du moins pour le béton de bois.

Au sein du laboratoire GEMH, cette nouvelle thématique a mis en place un grand nombre de protocoles expérimentaux et de nouvelles stratégies numériques. Il est évident que ce premier travail initié avec cette première thèse est loin d'être finalisé, ce qui nous invite à se projeter vers quelques perspectives concernant le modèle, sa mise en œuvre et sur toutes les échelles de caractérisation expérimentale.

- Au niveau du modèle, il est envisagé à court terme l'introduction de l'eau liquide dans le bilan du transfert pour quantifier l'effet de pluie battante. Egalement, l'effet de l'hystérésis, les fuites d'air et les ponts thermo-hydriques dynamiques intégrant les couplages rencontrés dans les parois courantes sont prévus d'y être intégrés dans le modèle.
- A plus long terme, il est attendu pour la mise en œuvre du modèle de considérer le renouvellement d'air, la réduction du temps de calcul, son adaptabilité en l'implémentant

dans TRNSYS ou à des problèmes de diagnostic, de performance énergétique et de pathologie (en rajoutant la partie mécanique).

- A l'échelle du matériau, l'utilisation de la MBV classique dans un protocole de caractérisation permettrait d'obtenir les propriétés de diffusion et les isothermes partielles. Ensuite, en ayant accès aux profils thermiques, l'essai doit permettre d'identifier la chaleur latente de sorption afin de définir les effets de couplage. L'ensemble demande l'utilisation du modèle et une optimisation des paramètres par méthode inverse.
- A l'échelle de la paroi, l'effet du couplage a été mis en évidence lorsque la paroi était sujette à un fort gradient hydrique. Cette caractéristique peut nous interpeller en proposant, par exemple, des parois internes dans un bâtiment pour générer des tampons hydriques apportant, d'une part, une régulation hydrique dans des pièces humides et, d'autre part, une inertie thermique indirecte par transfert hydrique.
- A l'échelle de la cellule, nos conclusions reposent uniquement sur une étude dans un climat semi continental rencontré en Corrèze. Il serait intéressant de dupliquer cette expérience dans d'autres climats plus chauds et/ou plus arides.
- A l'échelle du bâtiment, le double enjeu de l'étude du comportement thermo hydrique des enveloppes, à savoir le confort thermique et la consommation énergétique, nécessite une étude plus creusée des divers phénomènes. Une analyse multicritères, peut conduire à mieux définir leurs impacts réels. Les aspects économiques des maisons à enveloppe hygroscopique peuvent être abordés avec une quantification plus précise de la consommation énergétique globale annuelle (été, hiver et mi-saison). Cela impliquerait notamment des études d'optimisation sur la conception des enveloppes et des parois. Ainsi, la proposition de solutions techniques et bioclimatiques appropriées aux climats des aires d'étude sera envisagée pour l'amélioration des performances énergétiques.

Enfin, ce travail de recherche nous a permis de développer de solides connaissances tant du point de vue numérique qu'expérimental. Ces compétences seront un atout pour la poursuite de nos activités de recherche dans ce domaine, ou d'autres thématiques liées. La connaissance du comportement hygrothermique des enveloppes hygroscopiques est nécessaire en vue de l'évaluation des performances énergétiques et environnementales sur le chemin vers une **Architecture Durable**.

Références bibliographiques

- [ADEME, 2015] Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie, *Nos Expertises - Bâtiment*, [En ligne] <http://www.ademe.fr/expertises/batiment>, page consultée le 7/9/2015.
- [AFNOR, 2002] « Mesure de l'humidité de l'air - Enceintes climatiques et thermostatiques - Caractérisation et vérification » [En ligne] : <http://www.boutique.afnor.org/recherche/resultats/mot/nf%20x%2015-140categorie/normes>
- [Agoudjil et al, 2011] AGOUDJIL B., BENCHABANE A., BOUDENNE. A, IBOS L., FOIS M., *Renewable materials to reduce building heat loss: Characterization of date palm wood*, *Energy and Buildings* 43 (2011), pp : 491–497.
- [Ajibola, Onabanjo, 1995] AJIBOLA K., ONABANJO B. O., *Investigation of cocas nucifera as a potential insulator for buildings*, *Renewable energy*, , vol 6, N°1, (1995), pp : 81-84.
- [Allinson, Hall, 2010] ALLINSON D., HALL M., *Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK*, *Energy and Buildings* 42 (2010), pp : 845–852.
- [Ait Oumeziane, 2012] AÏT OUMEZIANE Y., *Vers la modélisation du comportement thermohydrrique d'une paroi en béton de chanvre*, Prix Jeunes Chercheurs « René Houpert », XXX^e Rencontres AUGC-IBPSA. Chambéry, 6 au 8 juin 2012.
- [Ait Oumeziane, 2012] AIT OUMEZIANE Y., « Evaluation des performances hygrothermiques d'une paroi par simulation numérique : application aux parois en béton de chanvre », Thèse de doctorat, INSA de Rennes, 2012.
- [Araujo Prado, Ferreira, 2005] ARAUJO P.R, FERREIRA. F, *Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials*, *Energy and Buildings* 37 (2005), pp : 295-300.
- [ASHRAE, 1992] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 55-1992, Thermal environmental conditions for human occupancy. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1992.
- [ASHRAE; 2010] INTERPRETATION IC 55-2004-3 OF ANSI/ASHRAE Standard 55-2004. Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta : ASHRAE; 2010.
- [ASHRAE, 2010] ANSI/ASHRAE (American National Standards Institute /American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers, «Thermal environmental conditions for human Occupancy » Standard 55-2004 2010, Atlanta, 2010.
- [Ashour et al, 2011(a)] ASHOUR T., GEORG H., WU W., *Performance of straw bale wall : A case of study*, *Energy and Buildings* 43, (2011), pp : 1960-1967.
- [Ashour et al, 2011(b)] ASHOUR T., GEORG H., WU W., *An experimental investigation on equilibrium moisture content of earth plaster with natural reinforcement fibres for straw bale buildings*, *Applied Thermal Engineering* 31 (2011), pp: 293-303.
- [Auliciems, Szokolay, 1997] AULICIEMS A. and SZOKOLAY S. V., « Thermal comfort», PLEA : Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, The University of Queensland Brisbane 4072 first published 1997, second revised edition 2007, 66 pages.

- [Bagnouls, Gaussen, 1957] BAGNOULS F. et GAUSSEN H., Les climats biologiques et leur classification, *Annales de Géographie*, vol. 66 N°355, (1957), pp : 193-220.
- [Becchio et al, 2009] BECCHIO C., CORGNATI S. P., KINDINIS A., PAGLIOLICO S., *Improving environmental sustainability of concrete products : Investigation on MWC thermal and mechanical properties*, *Energy and Buildings* 41 (2009), pp : 1127-1134.
- [Bederina et al, 2012] BEDERINA M., GOTTEICHA M., BELHADJ B., DHEILY R.M., KHENFER M.M., QUENEUDEC M., *Drying shrinkage studies of wood sand concrete – Effect of different wood treatments*, *Construction and Building Materials* 36 (2012), pp : 1066–1075.
- [Boulet, FCBA, 2012] BOULET S., FCBA « *Systèmes constructifs bois et thermique d’hiver Programme RT bois Typologies constructives évaluées* », Grand Colloque sur Le bois, atout énergétique des constructions performantes, 2 Février 2012.
- [Brunauer et al] S. BRUNAUER, P.-H. EMMET, E. TELLER, «*Adsorption of gases in multimolecular layers*», *J. Am., Chem. Soc.*, n° 60, (1938), pp : 309-320.
- [BSI, 2008] BS EN 15251 : 2007, Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics. British Standards Institute, London.
- [C&B 2012] CONSTRUCTIONS ET BIORESSOURCES, Document Technique C&B 2012, « Etat des lieux des connaissances actuelles sur le Fonctionnement Hygrothermique des matériaux biosourcés ».
- [CAST3M, 2014] [En ligne]: www-cast3m.cea.fr
- [Cagnon et al, 2014] CAGNON H., AUBERT J.E., COUTAND M., MAGNIONT C., *Hygrothermal properties of earth bricks*, *Energy and Buildings* 80 (2014), pp : 208–217.
- [CDER, 2013] Centre de Développement des Energies Renouvelables « CDER », Direction Générale de la Recherche Scientifique et du Développement Technologique, Algérie, [En ligne] <http://www.cder.dz/>, pages consultées le 11 août 2013.
- [CEBT, FFB, ADEME, 2004] Utilisation de la paille en parois de maisons individuelles à ossature bois, (p.32) (2004).
- [Černý et al, 2006] ČERNÝ, R., KUNCA, A., TYDLIAT, V., DRCHALOVA, J. ET ROVNANIKOVA P., *Effect of pozzolanic admixtures on mechanical, thermal and hygric properties of lime plaster*, *Construction Building Materials* 20 (2006), pp : 849–857.
- [Cerolini et al, 2009] CEROLINI S., D’ORAZIO M., DI PERNA C., STAZI A., *Moisture buffering capacity of highly absorbing materials* *Energy and Buildings* 41, pp : 164–168 (2009).
- [Cheng, Givoni, 2005] CHENG V., GIVONI B., *Effect of envelope colour and thermal mass on indoor temperatures in hot humid climate*, *Solar Energy* 78, (2005), pp : 528-534,.
- [Chow et al, 2010] CHOW T.T., FONG K.F., GIVONI B., LIN Z., CHAN A.L.S., *Thermal sensation of Hong Kong people with increased air speed, temperature and humidity in air-conditioned environment*, *Building and Environment* 45 (2010), pp : 2177- 2183.
- [Collet, 2004] COLLET F., « Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux ». Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Rennes, 2004.
- [Collet, et al, 2006] COLLET F., SERRES L., MIRIEL J., BART M., *Study of thermal behaviour of clay wall facing south*, *Building and Environment* 41 (2006), pp : 307–315.

- [Collet et al, 2011] COLLET F., PRETOT S., LANOS C., *Etude expérimentale du comportement hygrothermique d'une paroi en blocs de béton de chanvre avec ossature en bois*, XXIXe Rencontres Universitaires de Génie Civil. Tlemcen, 29 au 31 Mai 2011.
- [Collet et al, 2013] COLLET F., CHAMOIN J., PRETOT S., LANOS C., *Comparison of the hygric behaviour of three hemp concretes* Energy and Buildings 62 (2013), pp : 294–303.
- [Collet et al, 2013] COLLET F., PRETOT S., LANOS C., *Performance hydrique de bétons de chanvre : effet de l'enduit sur leur capacité de régulateurs hydriques*, 31èmes Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, 29 au 31 mai 2013.
- [Crank, Nicolson, 1947] CRANK J., NICOLSON P., « *A practical method for numerical evaluation of solutions of partial differential equations of the heat conduction type* », Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 1947.
- [Crank, 1975] CRANK J., The mathematics of diffusion Oxford University Press, 1975.
- [CSTB, 2009] Guide technique, Transferts d'humidité à travers les parois, Evaluer les risques de condensation, Septembre 2009, p 68.
- [De Bruijn, Johansson, 2013] DE BRUIJN P., JOHANSSON P., *Moisture fixation and thermal properties of lime-hemp concrete*, Construction and Building Materials 47 (2013), pp : 1235–1242.
- [de Dear, Brager, 1998] De DEAR J., BRAGER G.S., Developing an adaptive model of thermal comfort and preference, ASHRAE Transactions, vol 104(1), (1998), pp : 145-67.
- [de Dear, Brager, 2002] de DEAR J., BRAGER G.S., *Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55* Energy and Buildings 34 (2002), pp : 549–56.
- [Deuble, de Dear, 2012] DEUBLE M. P., DE DEAR R. J., *Mixed-mode buildings : A double standard in occupants' comfort expectations*, Building and Environment 54 (2012), pp : 53-60.
- [De Martonne, 1923 In Guyot, 1999] GUYOT. Gérard, « Climatologie de l'environnement Cours et exercices corrigés », Paris : ED DUNOD, 1999.
- [Deoux, 2004] DEOUX Suzane et Pierre, « Le guide de l'habitat sain : Habitat qualité santé pour bâtir une santé durable », 2ème Edition : MEDIECO EDITION, Andorre, Avril 2004.
- [En ligne] alertes-meteo.com
- [En ligne] Freemeteo.fr
- [En ligne] <http://logtagrecorders.com/>
- [En ligne] www.infoclimat.fr
- [En ligne] www.wimesure.fr
- [Evrard, 2008] EVRARD A., « Transient hygrothermal behaviour of Lime-Hemp Materials », Thèse de doctorat en Sciences de l'Ingénieur, Ecole Polytechnique de Louvain Unité d'Architecture, 2008.
- [Evrard, De Herde, 2009] EVRARD A., DE HERDE A., *Hygrothermal performance of lime-hemp wall assemblies*, Journal of building physics July 2010 vol. 34 no. 1 5-25 Online first (novembre 26, 2009) doi: 10.1177/1744259109355730.
- [Fang et al, 1998] FANG L., CLAUSEN G., FANGER P. O., *Impact of temperature and humidity on the perception of indoor air quality*, Indoor Air 8 (1998), pp : 80–90.

- [Fanguin, 2009] FANGUIN C., « Maison basse consommation : Guide de conception et de mise en œuvre - Pour la construction de maisons à ossature bois » Edition du CNDB : Comité National pour le Développement du Bois, Paris, octobre 2009.
- [Flory-Celini, 2008] FLORY-CELINI C. « Modélisation et positionnement de solutions bioclimatiques dans le bâtiment résidentiel Existant », Thèse de doctorat de l'Université Lyon 1 Claude Bernard, Spécialité Génie Civil, juin 2008
- [Fraisie, et al, 2006], FRAISSE G., JOHANNES K., TRILLAT-BERDAL V., ACHARD G., *The use of a heavy internal wall with a ventilated air gap to store solar energy and improve summer comfort in timber frame houses*, Energy and Buildings 38 (2006), pp : 293–302.
- [Givoni, 1978], GIVONI. B, « L'homme, l'architecture et le climat », Edition du MONITEUR, 1978.
- [González et al, 2007] GONZÁLEZ A.D., CARLSSON-KANYAMA A., CRIVELLI C., GORTARI S., *Residential energy use in one-family households with natural gas provision in a city of the Patagonian Andean region*, Energy Policy 35 (2007), pp : 2141–2150.
- [González, 2009] GONZÁLEZ A.D., *Energy subsidies in Argentina lead to inequalities and low thermal efficiency*, Energies 2 (2009) pp : 769–788.
- [González, 2014] GONZÁLEZ A. D., *Energy and carbon embodied in straw and clay wall blocks produced locally in the Andean Patagonia*, Energy and Buildings 70 (2014), pp : 15–22.
- [Goodhew, Griffiths, 2005] GOODHEW S., GRIFFITHS R., *Sustainable earth wall to meet the building regulations*, Energy and Building 37 (2005), pp : 451-459.
- [Gouny, 2013] GOUNY F., « Nouveau système constructif multi matériaux bois/liant géopolymétrique/brique de terre crue : formulation, caractérisation et transfert d'échelle. », Thèse de doctorat de l'Université de Limoges, Spécialité : Matériaux céramiques et traitements de surface, 2013.
- [Gustafsson, 1991] GUSTAFSSON S.E., *Transient plane source techniques for thermal conductivity and thermal diffusivity measurements of solid materials*, Review of Scientific Instruments, Volume 62, Issue 3, 1991, Pages 797-804.DOI: 10.1063/1.1142087.
- [Hall, 2007] HALL M. R., *Assessing the environmental performance of stabilised rammed earth walls using a climatic simulation chamber*, Building and Environment 42 (2007), pp : 139–145.
- [Hall, Allinson, 2009] HALL M., ALLINSON D., *Assessing the effects of soil grading on the moisture content-dependent thermal conductivity of stabilised rammed earth materials*, Applied Thermal Engineering 29 (2009), pp : 740–747.
- [Hall, 2010] Hall MR In [Liuzzi et al, 2013] LIUZZI S., HALL M.R., STEFANIZZI P., CASEY S.P., *Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate* Building and Environment 61, (2013), pp : 82-92.
- [Hameury, Lundstrom, 2004] HAMEURY S., LUNDSTRÖM T., *Contribution of indoor exposed massive wood to a good indoor climate: in situ measurement campaign*, Energy and Buildings 36, (2004), pp 281–292.
- [Hameury, 2005] HAMEURY S., *Moisture buffering capacity of heavy timber structures directly exposed to an indoor climate: a numerical study*, Building and Environment 40 (2005), pp : 1400–1412.

[Hegger et al, 2009] HEGGER M., AUCH-SCHWELK V, FUCHS M, ROSENKRANZ T., « Construire, Atlas des matériaux » Presses polytechniques et universitaires romandes, version originale published in 2005 by laminated folded brochure cover by the « Institut für International Architektur-Dokumentation GMBH & Co. KG », traduction française Albert Dubler et Yves Minssart, architectes, relecture scientifique: René Vitonne, professeur, architecte, 1ère Edition française, Lausanne, Suisse, 2009, p81.

[Henderson, 1952] HENDERSON S-M., « *A basic concept of equilibrium moisture* », Agric. Engng., n° 33, 1952, pp : 29-32.

[Hens, 2005] HENS H., Impact of hygric inertia on indoor climate : simple models, IEA-EXCO Energy Conservation in Buildings and Community Systems, Annex 41 “Moist-Eng” Trondheim meeting October 27-28-2005.

[IEA, 1996] IEA (International Energy Agency) Annex 24 Final Report, Heat, Air, and Moisture Transfer in Insulated Envelope Parts, vol. 1, Task 1, Modelling, Belgium, 1996.

[Indraganti, 2010 a] INDRAGANTI M., *Thermal comfort in naturally ventilated apartments in summer : Findings from a field study in Hyderabad, India*, Applied Energy 87, (2010), pp : 866–883.

[Indraganti, 2010 b] INDRAGANTI M., *Behavioural adaptation and the use of environmental controls in summer for thermal comfort in apartments in India*, Energy and Buildings 42, (2010), pp : 1019–1025.

[Jaakkola et al, 2013] JAAKKOLA M. S., QUANSAH R., HUGG T. T., HEIKKINEN S. A. M., JAAKKOLA J. J. K., *Association of indoor dampness and molds with rhinitis risk: A systematic review and meta-analysis*, Journal of Allergy and Clinical Immunology, In Press, Corrected Proof, Available online 10 September 2013.

[James et al, 2010] JAMES. C, SIMONSON C. J., TALUKDAR P., ROELS S., *Numerical and experimental data set for benchmarking hygroscopic buffering models*, International Journal of Heat and Mass Transfer 53, (2010), pp : 3638–3654.

[Jannot, 2008] JANNOT. Yves, « *Isothermes de sorption, modèles et détermination* », Cours, [En ligne] <http://Thermique55.com>

[Janssen, Christensen, 2013] JANSSEN H., CHRISTENSEN J. E., *Hygrothermal optimisation of museum storage spaces* Energy and Buildings 56 (2013), pp : 169–178.

[Jun Moon et al, 2014] JUN MOON H., HO RYU S., TAI KIM J., *The effect of moisture transportation on energy efficiency and IAQ in residential buildings*, Energy and Buildings 75, (2014) pp : 439–446.

[JSA, 2002] Japanese Standards Association, *Test method of adsorption/desorption efficiency for building materials to regulate an indoor humidity – Part 1: Response method of humidity*. 2002, JISA 1470-1 : 2002.

[Kalamees et al, 2009] KALAMEES T., KORPI M., VINHA J., KURNITSKI J., *The effects of ventilation systems and building fabric on the stability of indoor temperature and humidity in Finnish detached houses*, Building and Environment 44, (2009), pp : 1643–1650.

[Karlsson et al, 2013] KARLSSON J., WADSO L., OBERG M., *A conceptual model that simulates the influence of thermal inertia in building structures*, Energy and Buildings 60 (2013), pp : 146–151.

- [Kendrick et al, 2012] KENDRICK. C, OGDEN. R, WANG. X, BAICHE. B, *Thermal mass in new build UK housing: A comparison of structural systems in future weather scenario*, Energy and Buildings 48, (2012), pp : 40–48.
- [Kerestecioglu, Gu, 1989] KERESTECIOGLU A., GU L., *Incorporation of the Effective Penetration Depth Theory into TRNSYS*, Draft Report, Florida Solar Energy Center, Cape Canaveral, FL, 1989.
- [Koffi, 2009] KOFFI J. « Analyse multicritère des stratégies de ventilation en maisons individuelles » Thèse de doctorat, Université de la Rochelle, Juillet 2009.
- [Künzel, 1995] KÜNZEL HM. *Simultaneous heat and moisture transport in building components : One- and Two-dimensional calculation using simple parameters*, Thesis at Fraunhofer-IBP Stuttgart, 1995.
- [Künzel, Kiessel, 1997] KUNZEL H.M, KIESSEL K. « *Calculation of heat and moisture transfer in exposed building components* », International Journal of heat and Mass Transfer, Vol. 40, N°1, (1997), pp : 159-167.
- [Kunzel et al, 2004] KUNZEL, H. M., HOLM, A., SEDLBAUER, K., ANTRETTTER, F. & ELLINGER, M. Moisture buffering effect of interior linings made from wood or wood based products. IBP Report HTB-04/2004/e. Fraunhofer-Institute for Building Physics.
- [Kunzel et al, 2005] KUNZEL H.M., HOLM A., ZIRKELBACH D., KARAGIOZIS A.N., *Simulation of indoor temperature and humidity conditions including hygrothermal interactions with the building envelope*, Solar Energy 78 (2005), pp : 554–561.
- [Kruger, Givoni, 2008] KRUGER E., GIVONI B., *Thermal monitoring and indoor temperature predictions in a passive solar building in an arid environment*, Building and Environment 43 (2008) pp : 1792–1804.
- [Kwiatkowski 2009] KWIATKOWSKI J., « Moisture in Buildings Air-Envelope Interaction » Thèse de l'INSA de Lyon, Février 2009, p 164.
- [Kwiatkowski 2009] KWIATKOWSKI J., WOLOSZYN M., ROUX J-J., KWIATKOWSKI J., *Modelling of hysteresis influence on mass transfer in building materials*, Building and Environment 44 (2009), pp : 633– 642.
- [Kwiatkowski et al, 2011] KWIATKOWSKI J., WOLOSZYN M., ROUX J-J., *Influence of sorption isotherm hysteresis effect on indoor climate and energy demand for heating*, Applied Thermal Engineering 31 (2011), pp : 1050-1057.
- [Kwok, Rajkovich, 2010] KWOK A.G., RAJKOVICH N.B., *Addressing climate change in comfort standards*, Building and Environment 45 (2010), pp : 18–22.
- [LRA/GRECAU logiciel Cocon, FDES, EcoInvent In RFCP] Réseau Français de la Construction Paille – Les Compailleurs, Projet PRO-PAILLE, Acronyme : PRO-PAILLE – Support à la mise en place de règles professionnelles de construction en paille.
- [Lemaire, 2012] LEMAIRE C., *Mise en œuvre et emploi des matériaux de construction*, Editions Eyrolles, Paris, 2012, p 39.
- [Li, et al, 2012] LI Y., FAZIO P., RAO J., *An investigation of moisture buffering performance of wood paneling at room level and its buffering effect on a test room*. Building and Environment 47 (2012), pp : 205-16.
- [Liu et al, 2013] LIU Y., WANG Y., WANG D., LIU J., *Effect of moisture transfer on internal surface temperature*, Energy and Buildings 60 (2013), pp : 83–91.

- [Liuzzi et al, 2013] LIUZZI S., HALL M.R., STEFANIZZI P., CASEY S.P. *Hygrothermal behaviour and relative humidity buffering of unfired and hydrated lime-stabilised clay composites in a Mediterranean climate* Building and Environment 61 (2013), pp : 82-92.
- [LNE, 2014] Laboratoire National de métrologie et d'Essais de Trappes, Rapports d'essais, Conductivité thermique du matériau en terre et paille.
- [Lucas et al, 2002] LUCAS F., ADELARD L., GARDE F., BOYER H., *Study of moisture in buildings for hot humid climates*, Energy and Buildings 34 (2002), pp : 345–355.
- [Malsot, 2005] MALSOT J., DEROUBAIX G., PAQUET PH., RAJI S., PRIEUR A., LOCHU S., 2005: Extension de l'éligibilité de la séquestration forestière du carbone à l'ensemble des stocks de la filière bois. VIIIème Colloque ARBORA, Carbone, Forêt, Bois. ISTAB, BORDEAUX 1er et 2 décembre 2005.
- [Manfoumbi Boussougou, 2012] MANFOUMBI BOUSSOUGOU N., « Contribution à l'adaptation de l'Eurocode 5 aux essences tropicales dans leur environnement », Thèse de doctorat, spécialité Génie civil, Université de Limoges, 2012.
- [Martín et al, 2010] MARTÍN S., MAZARRÓN F. R., CAÑAS I., *Study of thermal environment inside rural houses of Navapalos (Spain): The advantages of reuse buildings of high thermal inertia*, Construction and Building Materials 24 (2010), pp : 666–676
- [McGregor, 2014] MCGREGOR F., HEATH A., SHEA A., LAWRENCE M., *The moisture buffering capacity of unfired clay masonry*, Building and Environment, volume 82, December 2014, pp 599–607.
- [Medjelekh, 2006] MEDJELEKH Dael ; « Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment : cas de l'habitation de l'époque coloniale à Guelma »; Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine ; Novembre 2006.
- [Medjelekh, Abdou, 2008] MEDJELEKH. D, ABDOU. S ; *Impact de l'inertie thermique sur le confort hygrothermique et la consommation énergétique du bâtiment*, Revue des énergies renouvelables, Vol 11 N°3, (2008), pp : 329-341.
- [Medjelekh, 2010] MEDJELEKH Dael, *Modélisation de l'impact de l'isolation thermique sur la température intérieure*, Revue des énergies renouvelables, Vol 13 N°2 (2010), pp : 265 – 273.
- [Medjelekh et al, 2010] MEDJELEKH D., ABDOU S., EL GANAOU M., *Impact of the thermal inertia of material on the hygrothermal comfort of building*, International Review of Chemical Engineering : IRECHE, Vol. 2 N. 3, pp : 391-397 ; May 2010.
- [Medjelekh, El Ganaoui, 2012] MEDJELEKH. D, EL GANAOU M., Evaluation climatique préliminaire à la position des problèmes de transferts de chaleur et de masse rencontrés dans le bâtiment, XXXe Rencontres AUGC -IBPSA, Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.
- [Medjelekh et al, 2012] MEDJELEKH D., DUBOIS F., ULMET L., Effet des inerties thermique et hydrique d'un matériau hygroscopique sur le confort thermique de l'habitat, XXXe Rencontres AUGC-IBPSA, 6 au 8 juin Chambéry, Savoie, France 2012.
- [Medjelekh et al, 2013] MEDJELEKH D., ULMET L., DUBOIS F., Impact de l'inertie thermique-hydrique sur le confort thermique de l'habitat : cas de la pierre (travertin), ECOBAT Sciences & Techniques 2013, 20 et 21 mars, Paris, France, 2013.

- [Medjelekh et al, 2013] MEDJELEKH D., ULMET L., DUBOIS F., Effet du comportement thermo-hydrigue de l'enveloppe hygroscopique sur le confort thermique de l'habitat : cas de la terre et la paille, CIFQ 2013 : XIème Colloque Interuniversitaire Franco-québécois sur la thermique des systèmes à 3 au 5 juin, Reims, France, 2013.
- [Medjelekh et al, 2014] MEDJELEKH D., ULMET L., DUBOIS F., Mesure et modélisation des transferts hygrothermiques d'une enveloppe en béton de bois, Conférence IBPSA France-Arras-2014.
- [Meissner et al, 2010] MEISSNER J.W., MENDES N., MENDONÇA K.C., MOURA L.M., *A full-scale experimental set-up for evaluating the moisture buffer effects of porous material*, International Communications in Heat and Mass Transfer 37 (2010), pp : 1197–1202.
- [Mendes et al, 2003] MENDES N., WINKELMANN F.C., LAMBERTS R., PHILIPPI P.C., *Moisture effects on conduction loads*, Energy and Buildings 35 (2003), pp : 631–644.
- [Mendonça, Bragança, 2007] MENDONÇA P., BRAGANÇA L., *Sustainable housing with mixed weight strategy-A case study*, Building and Environment 42, pp : 3432–3443.
- [Merakeb, 2006] MERAKEB S., Modélisation des structures en bois en environnement variable, Université de Limoges, Spécialité : Génie Civil, 2006.
- [Merakeb et al, 2009] MERAKEB S., DUBOIS F. & PETIT C., *Modeling of the sorption hysteresis for wood*, Wood Science and Technology, 43(7-8), (2009) pp : 575–589. Doi : 10.1007/s00226-009-0249-2.
- [Meukam, 2004] MEUKAM P., Valorisation des briques de terre stabilisées en vue de l'isolation thermique de bâtiments, *Thèse de doctorat* en cotutelle : Université de Cergy-Pontoise, Paris et l'Université de Yaoundé I, Cameroun, S : Energétique– Génie civil, (Déc 2004).
- [MINES ParisTech et Transvalor, 2015], MACC-RAD [En ligne] <http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/macc-rad>
- [Mitalas, 1970] MITALAS G., *Comments on the Z-Transfer function method for calculating heat transfer in buildings*, ASHRAE Transactions vol. 84 (1), (1971), pp : 667-674.
- [Mlakar, Strancar, 2013] MLAKAR J., STRANCAR J., *Temperature and humidity profiles in passive-house building blocks*, Building and Environment 60 (2013), pp : 185-193.
- [MEDDE, 2015(a)] Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, Commissariat Général au développement durable, *Le point sur le bilan énergétique de la France en 2014 : pic de production, plancher de consommation*, Observation et statistiques n° 207 Juillet 2015.
- [MEDDE, 2015(b)] Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, *Chiffres clés énergies-climat en France Panorama des principales données de consommation, de production, de prix et d'émissions de gaz à effet de serre*, Panorama énergies-climat, édition 2015.
- [MEDDE, 2015 (c)] Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie, Repères : *Chiffres clés du climat France et Monde*, Service de l'observation et des statistiques Édition 2015.
- [Morel, et al, 2001] MOREL J.C., MESBAH A., OGGERO M., WALKER P., *Building houses with local materials: means to drastically reduce the environmental impact of construction*, Building and Environment, 36 (2001), pp : 1119-26.

- [Nait-Ali et al, 2013] NAIT-ALI B., DANGLADE C., SMITH D.S., Haberko K., Effect of humidity on the thermal conductivity of porous zirconia ceramics, Journal of the European Ceramic Society 33 (2013), pp : 2565–2571
- [Nelder, R. Mead, 1965] NELDER J.A., MEAD R., *A simplex method for function minimization*, Computer Journal 7, (1965), pp : 308- 313.
- [Nguen, 2014] NGUEN T.A, « Approche expérimentale et numérique du comportement pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois », Thèse de doctorat, spécialité Génie civil, Université de Limoges, 2014.
- [Nicol et Humphreys, 2002] NICOL J.F., HUMPHREYS M.A., *Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings*, Energy and Buildings 34, (2002), pp : 563– 572.
- [Nicol, Humphreys, 2010], NICOL F., HUMPHREYS M., *Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251*, Building and Environment 45 (2010), pp : 11–17.
- [Nicol et al, 2012] NICOL, F., HUMPHREYS, M., ROAF, S., « Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice. Routledge, London », 2012, 186 pages.
- [Ould-Henia, 2003] OULD-HENIA. A, Choix climatiques et construction zones arides et semi arides : maison à cour de Bou-Saada , Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2003.
- [Orosa, Oliveira, 2009] OROSA J. A., C. A.OLIVEIRA, *Energy saving with passive climate control methods in Spanish office buildings*, Energy and Buildings 41 (2009), pp : 823–828.
- [Orosa, Oliveira, 2011] OROSA J. A., OLIVEIRA A. C., *A new thermal comfort approach comparing adaptive and PMV models*, Renewable Energy 36 (2011), pp : 951-956.
- [Orosa, Oliveira, 2012] OROSA. J. A, OLIVEIRA. A. C, *A field study on building inertia and its effects on indoor thermal environment*, Renewable Energy 37, (2012), pp : 89– 96 ;.
- [Osanyintola, Simonson, 2006] OSANYINTOLA O. F., SIMONSON C. J., *Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact*, Energy and Buildings 38 (2006), pp : 1270–1282.
- [Osanyintola et al, 2006] OSANYINTOLA O.F., TALUKDAR P., SIMONSON C. J., *Effect of initial conditions, boundary conditions and thickness on the moisture buffering capacity of spruce plywood*, Energy and Buildings 38 (2006), pp : 1283–1292.
- [Oti et al, 2009] OTI J.E., KINUTHIA J.M., BAI J., *Engineering properties of unfired clay masonry bricks*, Engineering Geology 107 (2009), pp : 130–139.
- [Padfield, 1998] PADFIELD TIM, «The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity», Ph.D. thesis The Technical University of Denmark Department of Structural Engineering and Materials, October 1998.
- [Padfield, Jensen, 2011] PADFIELD T., JENSEN L.A., *Humidity buffering of building interiors by absorbent materials*, 9th Nordic Symposium on Building Physics, Tampere, Finland, NSB 2011, pp : 475–482.
- [Paasi et al, 2001] PAASI J., NURMI S., VUORINEN R., STRENGELL S., MAIJALA P., *Performance of ESD protective materials at low relative humidity*, Journal of Electrostatics 51-52 (2001), pp : 429-434.

[Pedersen, 1990] PEDERSEN CR. « Combined heat and moisture transfer in building constructions », Ph.D. thesis. Report 214, Thermal Insulation Laboratory, Technical University of Denmark, 1990.

[Perré, 2003] PERRE P., *Procédés de transformation du bois avec transfert couplés matière – énergie*, Les recherches sur la formation du bois dans le département forêts et milieux naturels de l'INRA, Etats de lieux et perspectives, Documents C, Enjeux socioéconomiques et scientifiques, perspectives 2003-2007, 28 février 2003.

[Perré et al, 2007] PERRÉ P., HOUNGAN A. C., JACQUIN P., « *Mass diffusivity of beech determined in unsteady state using a magnetic suspension balance* », *Drying Technology*., 25(7- 8) (2007), pp : 1341-1347.

[Peuhkuri et al, 2008] PEUHKURI R., RODE C., and HANSEN K.K., *Non isothermal moisture transport through insulation materials*, *Building and Environment*, 43(5) : 811 822, 2008.

[Philip, De Vries, 1957] PHILIP J.R., DEVRIES D.A., Moisture movement in porous materials under temperature gradients, Transactions of the American Geophysical Union 38 (2), (1957), pp : 222–232. In Mendes, 2003.

[Pickett, 2003] PICKETT R., *The energy performance of log homes*. Documented energy-efficiency and thermal mass benefits ; Technical Committee of the Log Homes Council, Building Systems Councils ; National Association of Home Builders©. 2003.

[Piot, 2009] PIOT A., « Hygrothermique du bâtiment : expérimentation sur une maison à ossature bois en conditions climatiques naturelles et modélisation numérique », Thèse de Doctorat, INSA Lyon ; 2009.

[Piot et al, 2011], PIOT A., WOLOSZYN M., BRAU J., ABELE C., *Experimental wooden frame house for the validation of whole building heat and moisture transfer numerical models*, *Energy and Buildings* 43 (2011), pp : 1322–1328.

[Rafidiarison, 2012] RAFIDIARISON H. M. ; « Etudes expérimentales des transferts de masse et de chaleur dans les parois des constructions en bois, en vue de leur modélisation. Application aux économies d'énergie et au confort dans l'habitat » ; Thèse de doctorat, Université de Lorraine, Juillet 2012.

[Raji, 2006] RAJI Saed., « Caractérisation hygro-thermique par une approche multi échelle, de constructions en bois massif en vue d'amélioration énergétique et de valorisation environnementale », Thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, Spécialité : Sciences du bois, décembre 2006.

[Reindl et al, 1990] REINDL, D. T., BECKMAN, W. A., DUFFIE, J. A., *Diffuse Fraction Correlations*, *Solar Energy*, Vol. 45, No. 1, 1990, pp : 1-7.

[Rode et al, 2005] Rode C., R. PEUHKURI, L. H. MORTENSEN, K. K. HANSEN, B. TIME, A. GUSTAVSEN, T. OJANEN and J. AHONEN, K. SVENNBERG, L-E HARDERUP AND J. ARFVIDSSON « *Moisture Buffering of Building Materials* ». Report BYG·DTU R-126 2005. proj. nr.: 04023 Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark, [En ligne] www.byg.dtu.dk

[Roels, Janssen, 2005] ROELS S. and JANSSEN H., Is the moisture buffer value a reliable material property to characterize the hygric buffering capacities of building materials? *Working paper A41-T2-B-05-7 for IEA Annex 41 project, Whole Building Heat, Air and Moisture Response*, Trondheim, 2005.

- [Samri, 2008] SAMRI D., « Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique », Thèse de doctorat, INSA de Lyon, spécialité : Génie Civil, octobre 2008.
- [Sedlbauer, 2001] SEDLBAUER, K., KRUS, M., ZILLIG, W., KÜNZEL, H.M, *Mold growth prediction by computational simulation*, Moisture, Microbes and Health Effects : Indoor Air Quality and Moisture in Buildings Conference, IAQ 2001; San Francisco, CA; United States; 4 November 2001 through 7 November 2001; Code 95640.
- [Simonson et al, 2001] SIMONSON C.J., SALONVAARA M., OJANEN T., *Improving indoor climate and comfort with wooden structures*, VTT Publication 431, VTT Technical Research Centre of Finland, 2001, 200 p and appendix (A1-D14).
- [Simonson et al, 2002] SIMONSON C. J., SALONVAARA M., OJANEN T., *The effect of structures on indoor humidity – possibility to improve comfort and perceived air quality*, Indoor Air 12, (2002), pp : 243–251;.
- [Svennberg et al, 2004] SVENNBERG, K., L. HEDEGAARD, C. RODE., *Moisture buffer performance of a fully furnished room*, Proceeding of Whole Building Envelope IX, Clearwater Beach, Florida. ASHRAE.
- [Szokolay, 1980] SZOKOLAY, S. V., « Environmental science handbook for architects and builders ». LACASTRE, LONDON, NEW YORK: THE CONSTRUCTION PRESS, 1980, p 263.
- [Tang et al, 2008], TANG A-M, CUI Y-J, LE T-T., *A study on the thermal conductivity of compacted bentonites*, Applied Clay Science 2008 ; 41(3–4), pp : 181–9.
- [Taoukil et al, 2013] Taoukil D., EL BOUARDI A., SICK F., MIMET A., EZBAKHE H., AJZOUL T., *Moisture content influence on the thermal conductivity and diffusivity of wood–concrete composite*, Construction and Building Materials 48 (2013), pp : 104–115.
- [Toea, Kubota, 2013] TOEA C., KUBOTA A., *Development of an adaptive thermal comfort equation for naturally ventilated buildings in hot–humid climates using ASHRAE RP-884 database*, Frontiers of Architectural Research (2013) 2, pp : 278–291.
- [Toftum et al, 1998(a)] TOFTUM J., JORGENSEN A. S., FANGER P. O., *Upper limits for indoor air humidity to avoid uncomfortably humid skin*, Energy and Buildings 28 (1998), pp : 15-23.
- [Toftum et al, 1998(b)] TOFTUM J., JORGENSEN A.S., FANGER P.O., *Upper limits of air humidity for preventing warm respiratory discomfort*, Energy and Buildings 28 (1998), pp : 1-13.
- [Toguyeni, et al, 2012] TOGUYENIA D. Y.K., COULIBALY O., OUEDRAOGO A., KOULIDIATIA J., DUTIL Y., ROUSSE D., *Study of the influence of roof insulation involving local materials on cooling loads of houses built of clay and straw*, Energy and Buildings 50 (2012), pp : 74–80.
- [Tong et al, 2009], TONG FG, JING L, ZIMMERMAN RW., *An effective thermal conductivity model of geological porous media for coupled thermo-hydro-mechanical systems with multiphase flow*, International Journal Rock Mechanics Mining Science 2009, 46(8) : 1358–69.
- [Toppan, FBF, 2012] : TOPPAN E., FBF : Cellule économique de Bretagne, Observatoire économique de France Bois Forêt, Observatoire national de la construction bois 2012, Juin 2012.

- [Tran Le et al, 2010] TRAN LE A.D., MAALOUF C., MAI T.H., WURTZ E., COLLET F., *Transient hygrothermal behaviour of a hemp concrete building envelope*, Energy and Buildings 42 (2010), pp : 1797–1806.
- [Transbatibois, 2011] CRITT Bois [En ligne] <http://www.netbois.com/info/article-3111.htm>
- [TRNSYS, 2009] KLEIN S.A, BECKMAN W.A, MITCHELL J.W, et al., A transient system simulation program user manual, The solar energy laboratory, University of Wisconsin, Madison, USA ; 2009.
- [Tsutsumi, 2007] TSUTSUMI H., TANABE S., HARIGAYA J., IGUCHI Y., NAKAMURA G., *Effect of humidity on human comfort and productivity after step changes from warm and humid environment*, Building and Environment 42 (2007), pp : 4034–4042.
- [Ulmet, et al 2009] ULMET L., MERAKEB S., DUBOIS F., SAUVAT N., *Etude expérimentale et numérique du transfert hygrothermique des constructions en rondins de douglas*, VIIème Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes CIFQ 2009, 18-20 mai 2009, Lille.
- [Ulmet et al, 2012] ULMET L., SAUVAT N., DUBOIS F., *Calibration d'une double chambre climatique pour la caractérisation de murs en régime hygrothermique dynamique XXe Rencontres Universitaires de Génie Civil*, Chambéry, 6 au 8 juin 2012.
- [Wihan, 2007] WIHAN J., « Humidity in straw bale walls and its effect on the decomposition of straw », Thesis of University of East London School of Computing and Technology, July 2007.
- [Wolkoff, Kjærgaard, 2007] WOLKOFF P., KJÆRGAARD S. K., *The dichotomy of relative humidity on indoor air quality*, Environment International 33 (2007), pp : 850–857.
- [Woloszyn, 1999] WOLOSZYN. M., « Modélisation hygro-thermo-aéraulique des bâtiments multizones: proposition d'une stratégie de résolution du système couple » ; Thèse de Doctorat INSA Lyon ; 1999.
- [Woloszyn et al, 2008] WOLOSZYN M., RODE C., ROUX J-J., *Synthèse sur la modélisation thermo-hygro-aéraulique des bâtiments dans l'Annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie*, IBPSA France 2008, Lyon 6-7 novembre 2008.
- [Woloszyn et al, 2008] WOLOSZYN M., RODE C., ROUX J-J., *Synthèse sur la modélisation thermo-hygro-aéraulique des bâtiments dans l'Annexe 41 de l'Agence Internationale de l'Energie*, IBPSA France, Lyon 6-7 novembre 2008.
- [Woloszyn et al, 2009] WOLOSZYN M., KALAMEES. T., ABADIE. M.O, STEEMAN M., KALAGASIDIS A.S., *The effect of combining a relative-humidity-sensitive ventilation system with the moisture-buffering capacity of materials on indoor climate and energy efficiency of buildings*, Building and Environment 44 (2009), pp : 515–524.
- [Woloszyn, 2013] In Groupe d'Analyse Prospective Thématique Bâtiment et Ville Durables, « Livre blanc sur les recherches en énergétique des bâtiments », Paris Presses des Mines, Collection développement durable, 2013.
- [Woloszyn et al, 2014] WOLOSZYN M, LE PIERRES N., KEDOWIDE Y., J. VIRGONE, TRABELSI A., SLIMANI Z., MOUGEL E., REYMOND R., RAFIDIARISON H., PERRE P., PIERRE F., BELARBI R., ISSAADI N., ABAHRI K., BEJAT T., PIOT A., WURTZ E., DUFORESTEL T., M. COLMET DAAGE, PERRIN B., COUTAND M., O. VOLOLONIRINA, POMPEO C., JOMAA W., LAUFFER J-S., THIRIET P., DISS R., REMOND N., LEGRAND O., *Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des*

BATiments performants: démarche du projet HYGRO-BAT, Conférence IBPSA France-Arras-2014.

[WUFI, 2015] [En ligne] <http://www.wufi-pro.com>

[Yao et al, 2009] YAO R., LI B., STEEMERS K., SHORT A., *Assessing the natural ventilation cooling potential of office buildings in different climate zones in China*, Renewable Energy 34 (2009), pp : 2697–2705.

[Yoshino et al, 2009] YOSHINO H., MITAMURA T., HASEGAWA K., *Moisture buffering and effect of ventilation rate and volume rate of hygrothermal materials in a single room under steady state exterior conditions*, Building and Environment 44 (2009), pp : 1418–1425.

[Zarr et al, 1995] ZARR R. R., BURCH D. M., FANNEY A. H., 1995 : Heat and Moisture Transfer in Wood-Based Wall Construction: Measured Versus Predicted. National Institute of Standards and Technology Building Science Series 173. Natl. Inst. Stand. Technol. Bldg. Sci. Ser. 173, 83 pages (Feb. 1995). CODEN : NBSSES.

[Zhang et al, 2012] ZHANG H., YOSHINO H., HASEGAWA K., *Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method*. Building and Environment 48 (2012), pp : 27-34.

[Zerhouni, Guillaud, 2001], ZERHOUNI S., GUILLAUD H. avec la collaboration de MOUYAL E., « L’architecture de terre au Maroc », ACR Edition, Courbevoie (Paris), France, 312 p, (2001).

[Zerizer et al, 2006] ZERIZER A., TAZROUT M., MARCHAL R., BOUKANTAR A., *Aspects économiques et états des lieux des ressources forestières algériennes*, Rapport de recherche, Laboratoire des matériaux minéraux et composites, département de génie des matériaux, Université A. Bougara, Boumerdes, Université M. Mammeri Tizi-ouzou, Algérie, LABOMAP, ENSAM Cluny, France, 2006.

Annexes

« Généralement les gens, quand ils font quelque chose, et que la chose est déjà bien, renoncèrent à approfondir et se conforment avec le résultat obtenu. C'est une erreur, quand une chose est sur le chemin de la perfection, on doit la retoucher jusqu'à ce qu'elle soit parfaite. »

Antonio Gaudi

Annexe A : Monitoring des maisons

A-1. Etude climatique et confort

1. Maison en pierre « Travertin » à Guelma (Algérie)

1-1. Caractérisation climatique de l'aire d'étude

1-1-1. Paramètres climatiques

Il s'agit d'un climat subhumide, d'après le calcul d'indice d'aridité de Martonne : $IDM = 24,7$: où $20 < IDM < 30$. La moyenne mensuelle de l'humidité relative dépasse 68,3 % avec une moyenne maximale de 94,2 % et une moyenne minimale de 29,1 %. C'est aussi un climat chaud en été et froid en hiver, caractérisé par une température annuelle moyenne de 17,9 °C avec 27,7 °C en août et 10 °C en janvier. Près de 57% de la pluviométrie est enregistré en hiver avec un maximum de 137,7 mm en décembre du total annuel 688,3 mm (Figure A-1-1). La vitesse moyenne des vents prédominants varie de 1,46 à 2 m/s pour une moyenne annuelle de 1,80 m/s. Mais il est enregistré 36,2 jr/an de Sirocco.

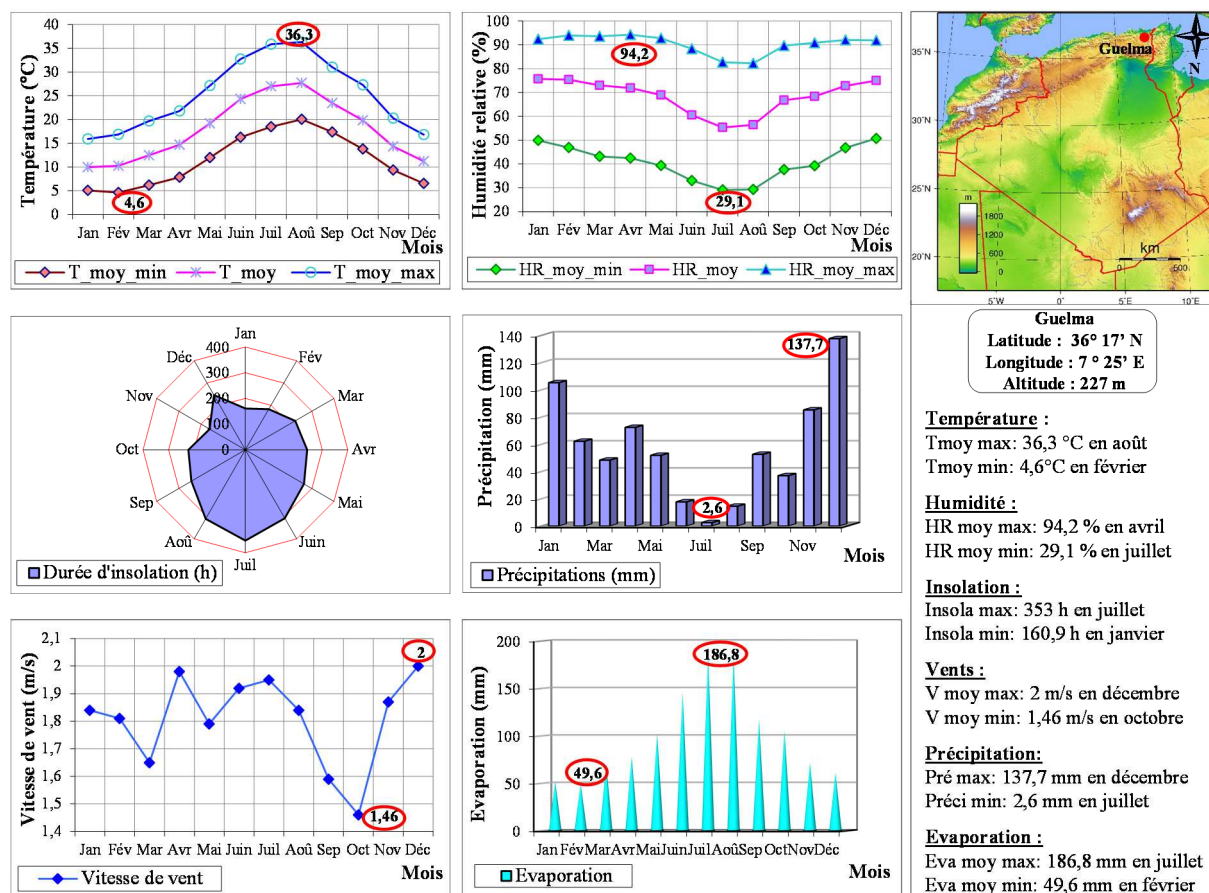


Figure A-1-1 : Caractéristiques climatiques de la région d'étude « Guelma »

Le graphique ombrothermique de Guelma (Figure A-1-2), fait distinguer une courte période sèche, de trois mois, qui s'étale du début juin au début septembre.

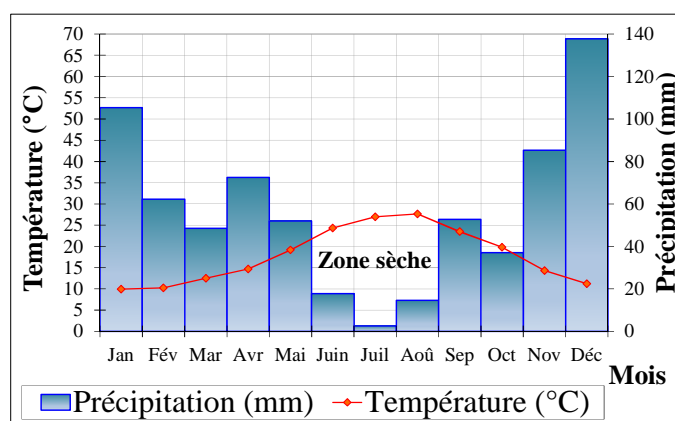


Figure A-1-2 : Diagramme ombrothermique de Guelma

1-1-2. Etude bioclimatique

Le diagramme psychrométrique établi sur la région montre la possibilité du chauffage passif pour les mois assez froids comme octobre, mars ; et le chauffage d'appoint pour les mois les plus froids tel que janvier. En été, c'est plutôt la nécessité de la ventilation naturelle, la masse thermique et l'humidification de l'air (l'enveloppe hygroscopique est indirectement recommandée, Figure A-1-3). Le diagramme solaire de Guelma illustre l'ampleur de la zone de surchauffe qui s'étale du mois de juin à la fin du mois de septembre (Figure A-1-4).

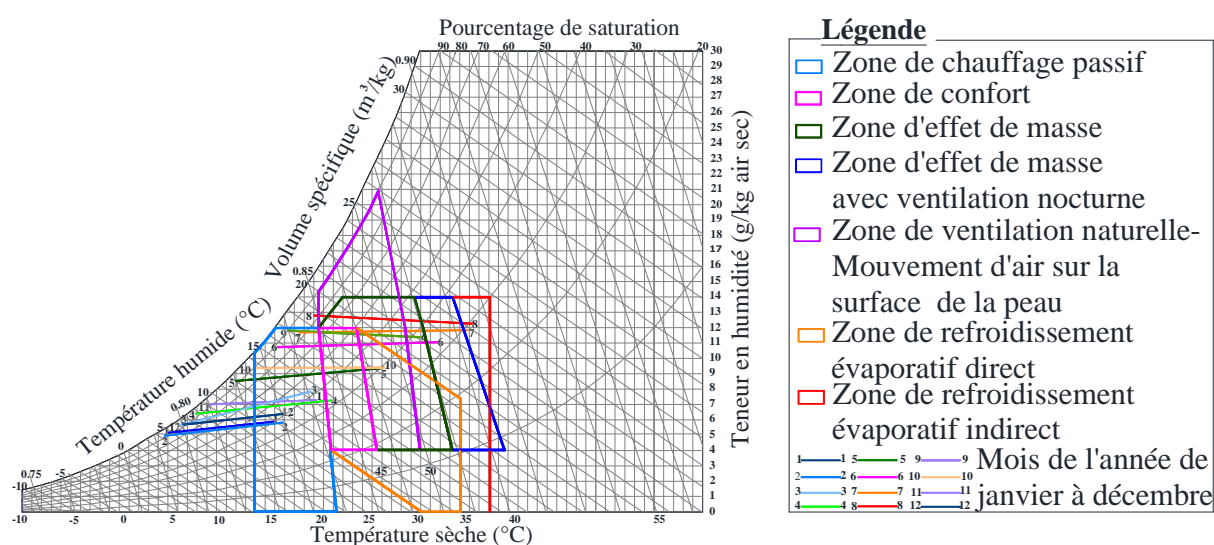


Figure A-1-3 : Diagramme psychrométrique de Guelma



Figure A-1-4 : Diagramme solaire de Guelma

1-1-3. Microclimat

Quant au microclimat, il y a plusieurs paramètres qui agissent et participent simultanément surtout dans l'élévation de la température et le taux d'humidité. On cite la densité urbaine, la présence de places végétalisées, les vents chauds, etc. (Figure A-1-5).

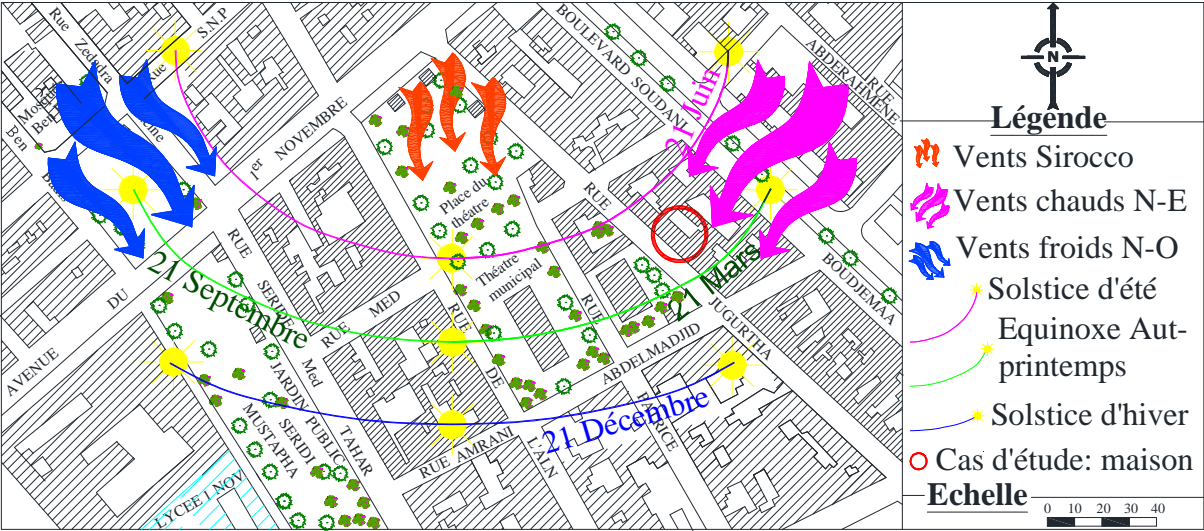


Figure A-1-5 : Paramètres agissant sur le microclimat de l'aire d'étude

1-2. Analyse du niveau de confort hygrothermique de la maison

L'équation (II.3) d'ASHRAE donne les températures mensuelles moyennes de confort pour Guelma de 21,6 °C l'hiver et 26,5 °C l'été. Pour l'acceptabilité de 80%, une gamme adaptative de confort suggérée entre 18,1 (en février) et 30,9 °C (en août) au-dessus du cycle annuel. Pour

l'acceptabilité 90 % la gamme adaptative de confort est comprise entre 19,1 et 29,9 °C au-dessus du cycle annuel. Tandis que l'équation empirique de Nicol et Humphreys (2002) ($T_c = 0,54 \times T_m + 13,5$) donne une température moyenne de confort de 20,1°C l'hiver et 28,7°C l'été avec une gamme adaptative entre 17,4 (en février) et 32,2°C (en août) sur le cycle annuel. D'après ces limites de confort des deux équations, les espaces internes en été sont jugés acceptables avec une limite supérieure de confort légèrement dépassée les jours de canicule.

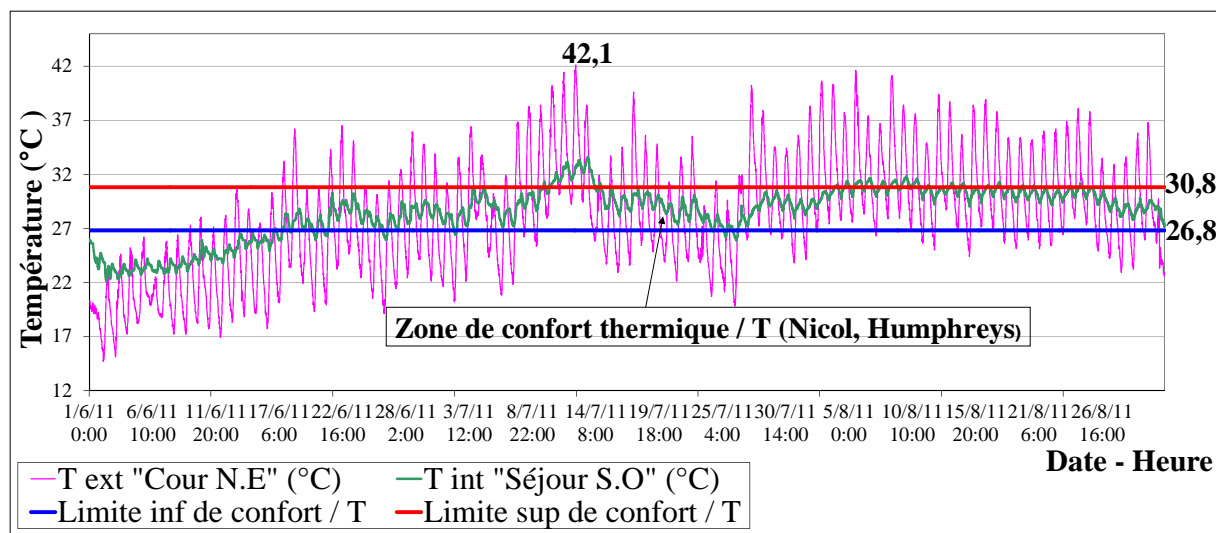


Figure A-I-6 : Comparaison des températures intérieures dans le séjour S.O avec les limites de confort/T (Nicol, humphreys), saison d'été « maison en pierre »

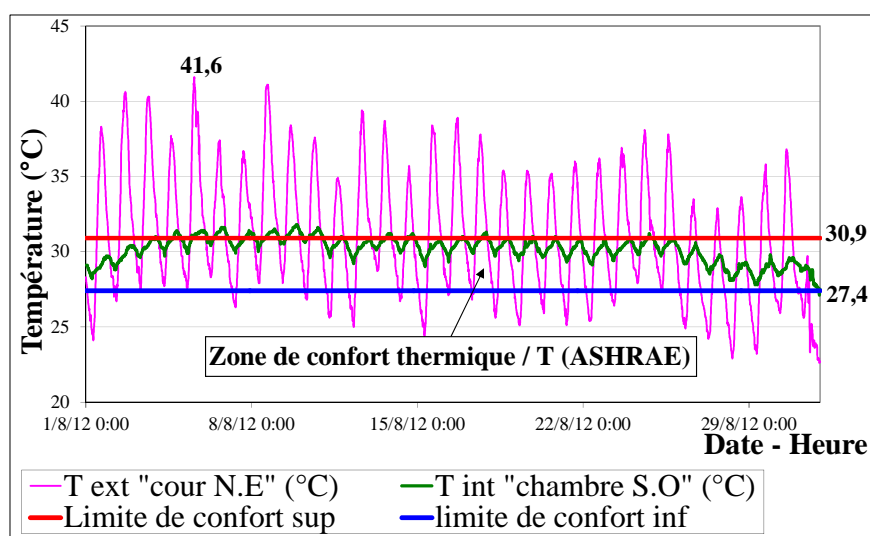


Figure A-I-7 : Comparaison des températures intérieures dans la chambre S.O avec les limites de confort/T d'ASHRAE à Guelma (du 01/08 au 31/08/2012) « maison en pierre »

La comparaison avec les limites de confort pour l'humidité, recommandées par la norme d'ASHRAE, (2010) montre que les espaces internes en été sont également jugés confortables. L'humidité relative extérieure et intérieure dépassent la limite supérieure de confort les jours orageux et se trouvent en dessous de la limite inférieure les jours de canicule (Figure A-1-8).

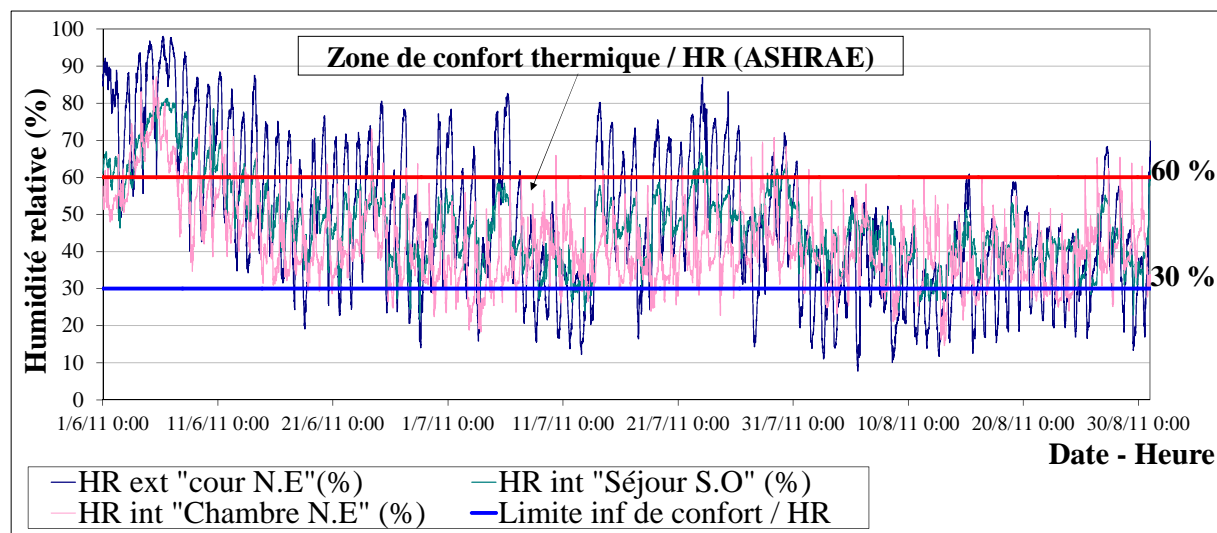


Figure A-1-8 : Comparaison de l'humidité relative intérieure dans le séjour S.O et la chambre N.E avec les limites de confort / HR de ASHRAE dans la région : saison d'été du 01/6 au 31/8/2011 « maison en pierre »

1-3. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période hiver

En hiver, la température du séjour est très stable, de 2,16°C d'amplitude moyenne max. La diminution du chauffage le soir, la ventilation et les tâches ménagères le matin causent son abaissement. Il est marqué 17,1°C d'écart max de la température extérieure, malgré que le chauffage soit placé dans le couloir. La capacité thermique élevée des murs permet d'éviter les chutes trop brutales de température. Elle stocke et régule les apports gratuits en autorisant une gestion intermittente du chauffage, qui évite le risque du refroidissement potentiel et maintient une température de confort. L'inertie thermique assure la protection des déperditions par convection ou des infiltrations et la mitoyenneté diminue les déperditions de chaleur.

La température dans la chambre N.E est aussi plus stable que celle de l'extérieur, avec une amplitude moyenne max de 2,07 °C. Elle dépasse celle-ci avec un écart max de 15,1°C (Figure A-1-10). La chambre ne profite pas au maximum des apports de chaleur du chauffage (par renouvellement d'air), vu sa situation. Sa porte est aussi gardée fermée le soir et la nuit. Mais sa température ambiante est maintenue près de la température de confort 19°C. Ceci révèle que

l'enveloppe grâce aux matériaux utilisés joue le rôle d'isolant en limitant les pertes de la chaleur intérieure et en étalant la pénétration du froid extérieur. Les chutes dans la température intérieure sont enregistrées soit le matin entre 9h et midi (lors de la ventilation matinale et les tâches ménagères) soit l'après-midi (où la température extérieure est élevée). À cause de l'orientation nord-est, la chambre ne bénéficie pas de l'énergie disponible des gains solaires.

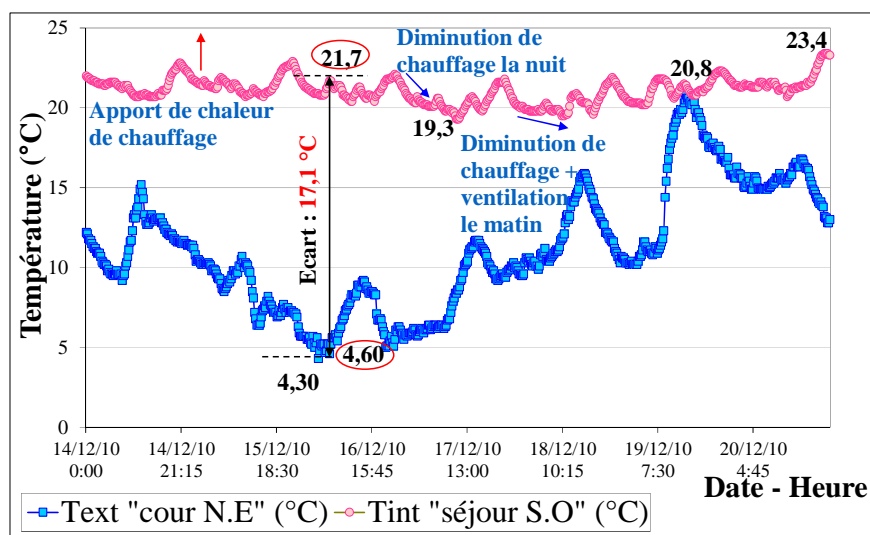


Figure A-1-9 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas du séjour S.O, période hivernale « maison en pierre »

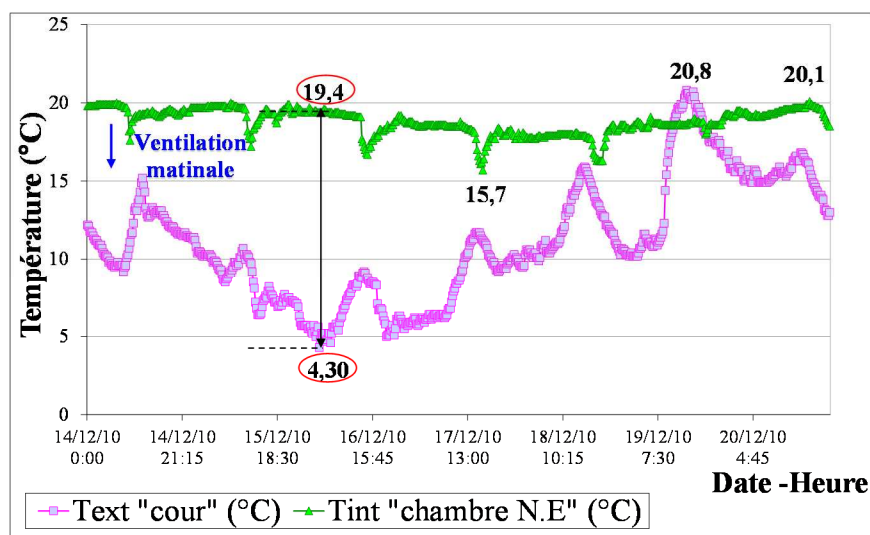


Figure A-1-10 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de la chambre N.E, période hivernale « maison en pierre »

Comme c'est l'hiver, l'humidité relative extérieure dépasse celle de l'intérieur pour la plupart du temps. Un écart max de 44,8% a été enregistré entre les deux humidités (Figure A-

1-11). L'humidité intérieure est plus stable que celle de l'extérieur. Cet équilibre hygrométrique intérieur est assuré d'une part par l'inertie thermique et hydrique de l'enveloppe, d'autre part par l'uniformité de la température ambiante. L'utilisation du chauffage permet la stabilisation de l'humidité relative intérieure le soir. Les usagers de leur part, par l'évapotranspiration, participent à l'augmentation de l'humidité relative ambiante. Les chutes de celle-ci sont surtout enregistrées aux moments de la ventilation matinale.

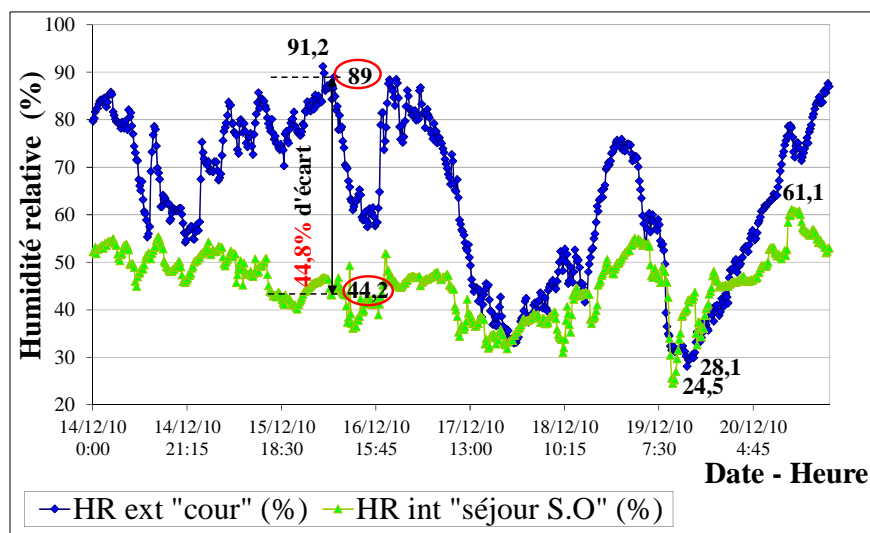


Figure A-1-11 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas du séjour S.O, période hiver « maison en pierre »

La variation de l'humidité spécifique intérieure ne dépend pas de la variation de l'humidité spécifique extérieure, qui est inférieure à cause de la température extérieure marquant de faibles valeurs jusqu'à 4,30°C (Figure A-1-12). A chaque baisse de la température extérieure, l'humidité spécifique intérieure augmente et le contraire est vrai. Mais chaque élévation de l'humidité spécifique intérieure précède à chaque fois de 1h à 3h une élévation de la température intérieure. Ceci confirme que la chaleur latente présente un apport additionnel de chaleur en hiver : générée surtout par l'évapotranspiration des usagers. La part des matériaux de l'enveloppe ne peut à priori être considérée participer à cet apport de chaleur.

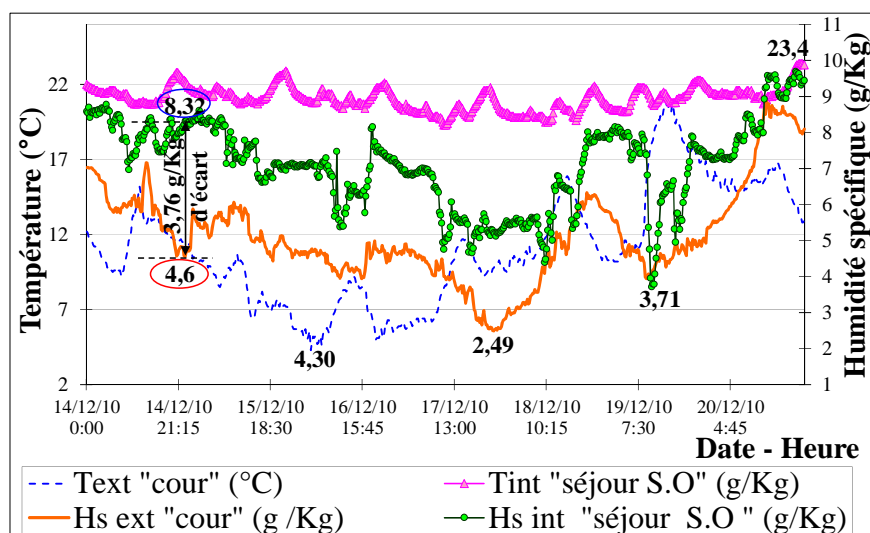


Figure A-1-12 : Variation horaire de la température intérieure et l'humidité spécifique intérieure et extérieure : cas du séjour, période hivernale « maison en pierre »

1-4. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période mi-saison

En mi-saison, les apports solaires sont supérieurs à ceux de l'hiver. L'augmentation des apports gratuits entraîne une augmentation des apports récupérés. A cause de la forte inertie thermique de la maison, ces apports pléthoriques de chaleur sont en partie absorbés. Et d'autant mieux, s'il est prévu un rafraîchissement, l'inertie stocke la fraîcheur nocturne et la diffuse la journée suivante. Les températures ambiantes se trouvent dans la plage de confort thermique (Figure I-1-13). Pareillement, l'humidité relative ambiante se situe dans les limites de confort, avec un écart max de 28,3 %HR de l'humidité relative externe (Figure I-1-14).

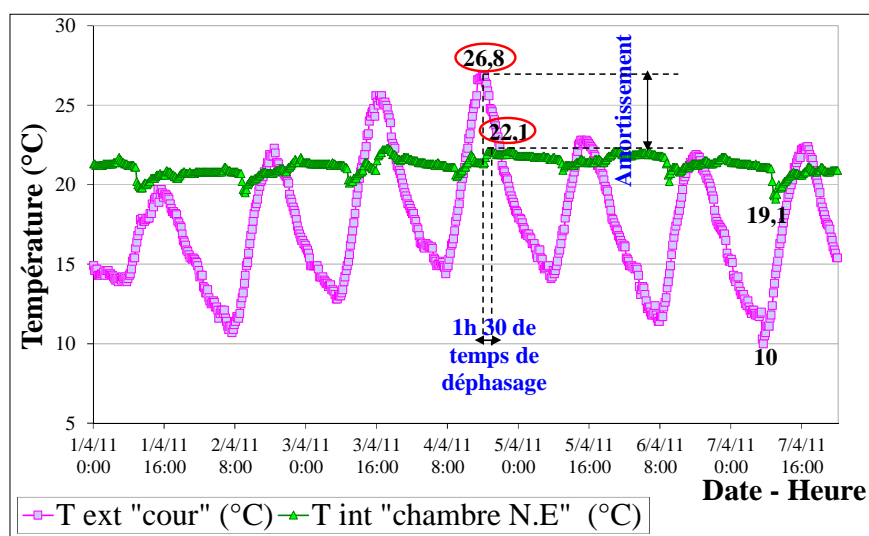


Figure A-1-13 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de la chambre N.E, période mi-saison « maison en pierre »

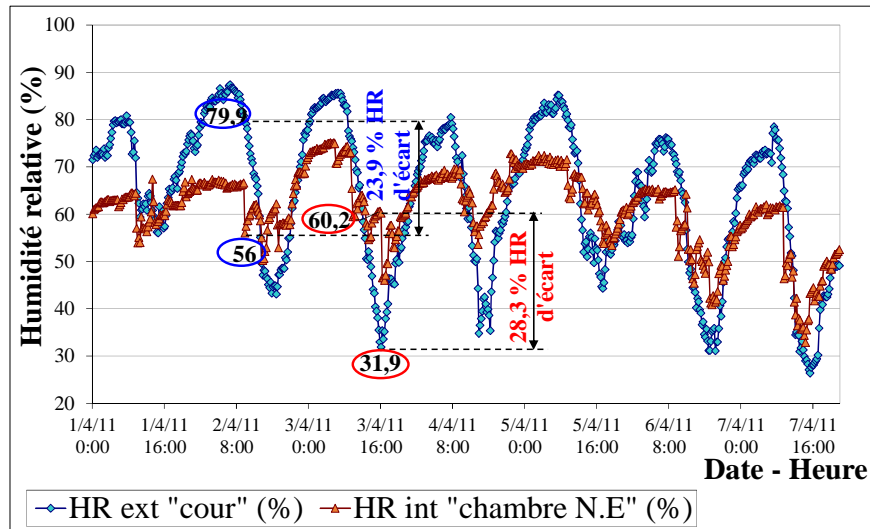


Figure A-1-14 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de la chambre N.E, période mi-saison « maison en pierre »

A cause des charges internes, l'humidité spécifique intérieure dépasse celle de l'extérieur d'un écart max de 4,45 g/Kg (Figure A-1-15).

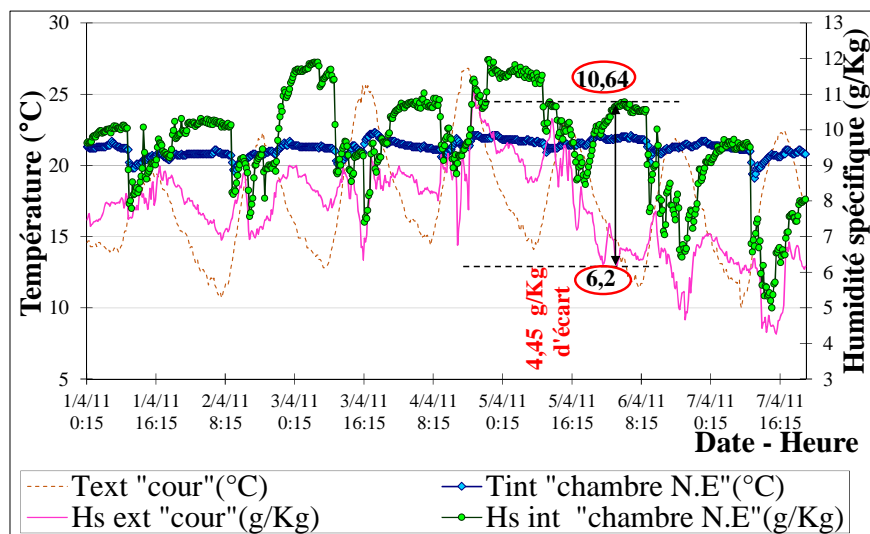


Figure A-1-15 : Variation horaire de la température et l'humidité spécifique, intérieures et extérieures : cas de la chambre N.E, période mi-saison « maison en pierre »

2. Maison à enveloppe préfabriquée en plaques de plâtre à Séraïdi (Algérie)

2-1. Caractérisation climatique de l'aire d'étude

2-1-1. Paramètres climatiques

Séraïdi est un village forestier, situé à 12 Km de la ville d'Annaba, sur les hauteurs du massif de l'Edough, 850 m à 1100 m d'altitude. Il est limité au Nord par la mer méditerranée, au sud par la plaine d'Annaba et la dépression de lac FETZARA. Le climat de Séraïdi est froid, pluvieux en hiver, doux et humide en été avec une moyenne maximale de 28,9 °C en août et une moyenne minimale de 4,5 °C en février. L'humidité est élevée l'hiver comme l'été, de moyennes maximale et minimale de 85,2 % prélevée en avril et 56,8 % en août. L'insolation est considérable en été d'un maximum de 320 h en juillet. Les précipitations sont très importantes en hiver avec un maximum de 264,56 mm enregistré en décembre, et faibles en été avec un minimum de 5,63 mm en juillet (Figure A-1-16).

Le graphique ombrothermique de Séraïdi (Figure A-1-17) confirme la douceur du climat avec une très courte période sèche, repérée en saison d'été.

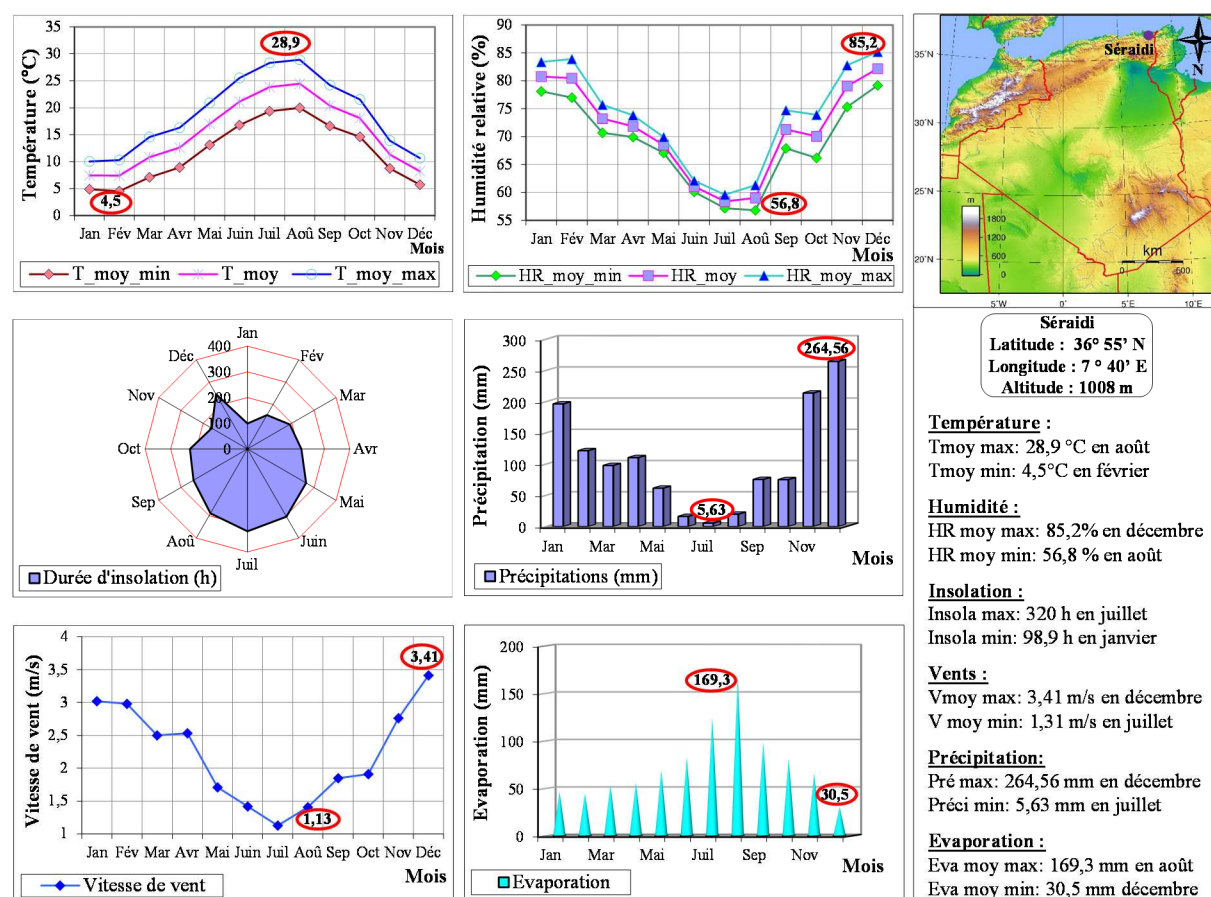


Figure A-1-16 : Caractéristiques climatiques de la région d'étude « Séraïdi »

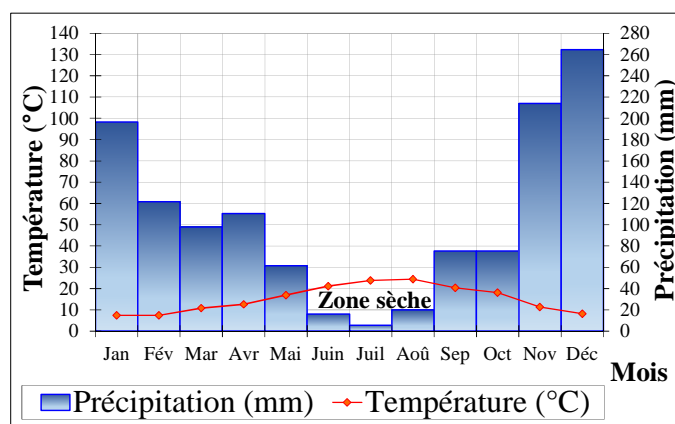


Figure A-1-17 : Diagramme ombrothermique de Séraïdi

2-1-2. Etude bioclimatique

Les recommandations tirées du diagramme psychrométrique de Séraïdi concerne la possibilité du chauffage passif pour les mois d'octobre et avril. Le chauffage d'appoint est en revanche préconisé pour la plupart des mois froids (décembre, janvier, février, mars). La masse thermique avec la ventilation naturelle et nocturne sont prévues l'été, mais aucun mois ne nécessite l'humidification de l'air du fait que le climat est humide (Figure A-1-18). Le diagramme solaire de Séraïdi illustre plutôt une petite zone de chauffe (à T_{\max} de 28,9 °C) et non de surchauffe, qui s'étale du mois de juin à la fin du mois d'août (Figure A-1-19).

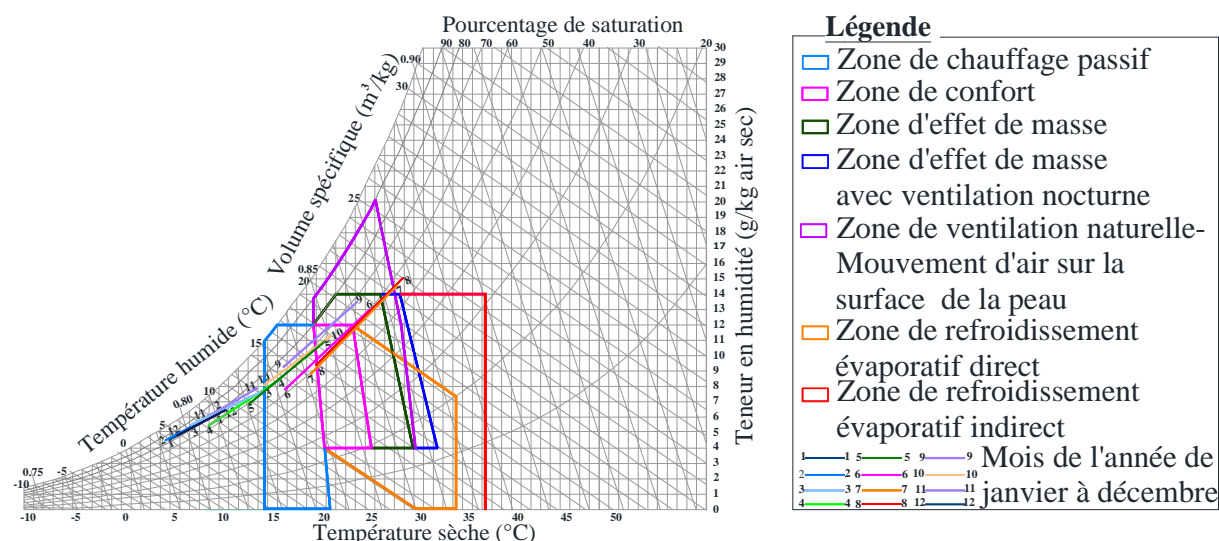


Figure A-1-18 : Diagramme psychrométrique de Séraïdi

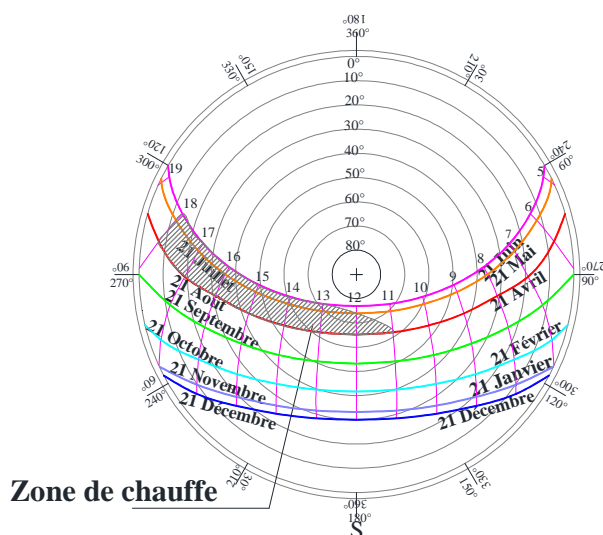


Figure A-1-19 : Diagramme solaire de Séraïdi

2-1-3. Microclimat

Le microclimat de la région d'étude est aussi humide, caractérisé par l'évaporation des eaux de mer en été et les brouillards en hiver. La montagne d'un côté et la mer d'un autre fournissent l'effet de brises naturelles (de mer et de terre) qui rafraîchissent l'air. Le couvert végétal dense (chêne liège, chêne zeen, pin maritime, sapin) garanti ce rafraîchissement et assure la bonne qualité de l'air.



Figure A-1-20 : Paramètres agissant sur le microclimat de l'aire d'étude à Séraïdi

2-2. Analyse du niveau de confort hygrothermique de la maison

Vu le caractère du climat de Séraïdi, les températures de confort déduites de l'équation (II.3) d'ASHRAE donnent 20,2 °C l'hiver et 25 °C l'été. La gamme de confort adaptative au-dessus du cycle annuel est comprise entre 16,7-28,5 °C et 17,7-27,5°C, respectivement pour 80% et 90% d'acceptabilité. La comparaison des températures ambiantes avec la température de confort du mois d'août (25,4 °C) révèle que les espaces internes sont jugés acceptables. Les limites supérieures sont en revanche dépassées les jours de canicule (Figure A-1-21).

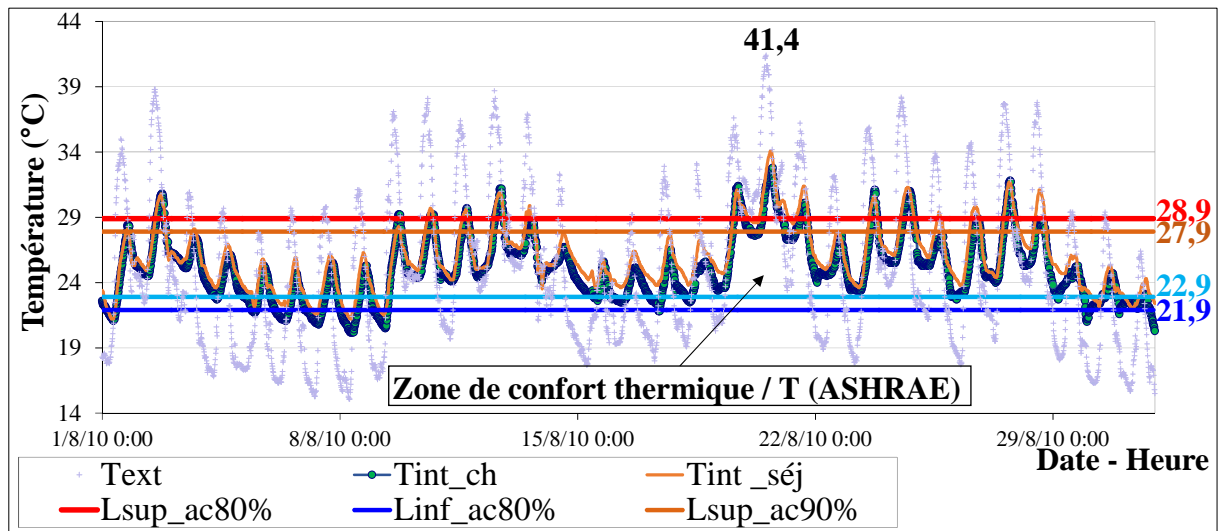


Figure A-1-21 : Comparaison des températures intérieures dans le séjour N.O/S.E et la chambre N.O avec les limites de confort/T d'ASHRAE dans la région, mois d'août

En termes d'humidité, la comparaison avec les limites de la norme d'ASHRAE, (2010) montre que les ambiances internes en été sont également jugés acceptables. En raison du climat humide et avec l'ouverture des fenêtres, la limite supérieure du confort est fréquemment dépassée (Figure A-1-22). En revanche les limites d'humidité de la norme ASHRAE 55 sont plutôt spéculatives, manquent de soutien théorique et empirique, donc à ne pas appliquer de façon très stricte.

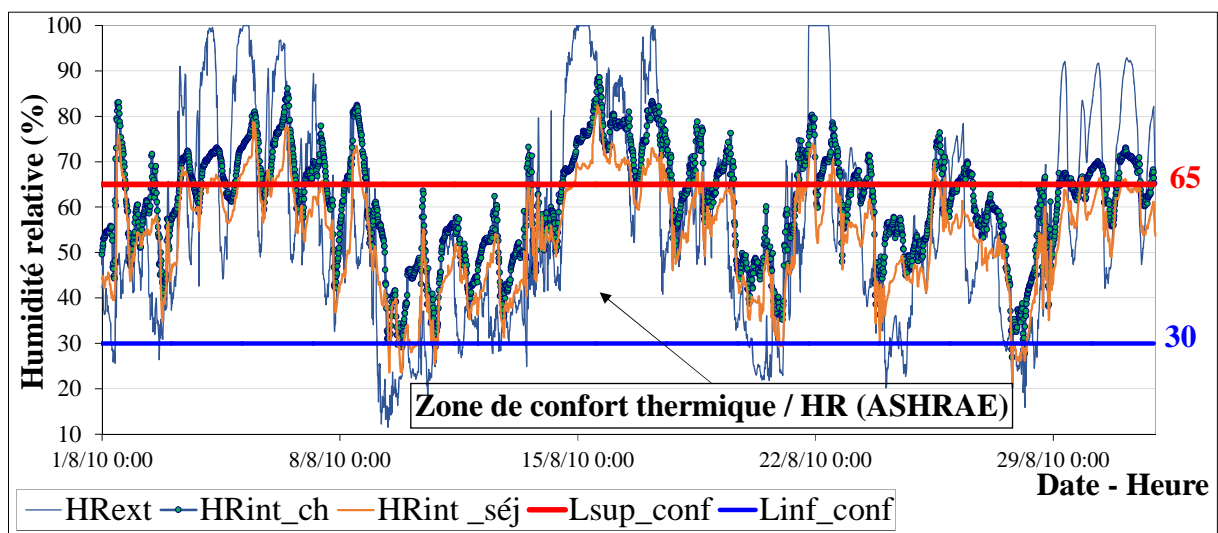


Figure A-1-22: Comparaison de l'humidité relative intérieure dans le séjour N.O, S.E et la chambre N.O avec les limites de confort / HR de ASHRAE : mois d'août, M plaque de plâtre

2-3. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période hiver

En hiver, la température ambiante de la chambre offre une stabilité avec une amplitude moyenne max de 3,58°C, même si le chauffage est installé loin, au niveau du couloir. Elle chute après 22h avec sa diminution, et le matin entre 9h et midi avec l'ouverture des fenêtres pour les tâches ménagères. Quoique l'inertie thermique de l'enveloppe soit faible, un écart max de 18,6 °C a été marqué entre la température intérieure et extérieure (Figure A-1-23). Le chauffage permet de garder la température aux limites du confort thermique. Or l'étalement de la pénétration du froid extérieur peut être attribué à l'effet de l'inertie hydrique et les matériaux hygroscopiques de l'enveloppe, comme la ventilation est omise au cas de l'hiver.

Du même, la température ambiante du séjour est aussi stable, d'une amplitude de 3,86 °C. Un écart max de 17,1 °C a été enregistré par rapport à la température extérieure (Figure A-1-24). Le chauffage dans le cas du séjour est plus proche, y a un profit de l'apport de chaleur par renouvellement d'air et par conduction à travers la paroi.

L'humidité relative extérieure quant à elle précède celle de l'intérieur pour la plupart du temps (surtout les jours pluvieux) avec un écart max de 37%. Néanmoins, en raison des charges hydriques internes, l'humidité relative ambiante dépasse aussi celle de l'extérieur d'un écart max de 39,2% (Figure A-1-25). La ventilation, au moment des tâches ménagères le matin, cause l'abaissement de l'humidité intérieure.

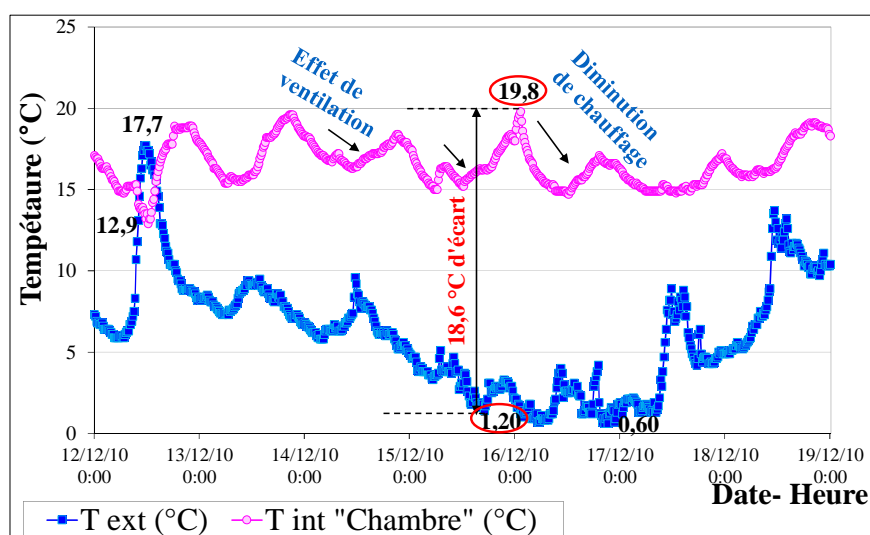


Figure A-1-23 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de la chambre N.O, semaine d'hiver « maison en plaques de plâtre »

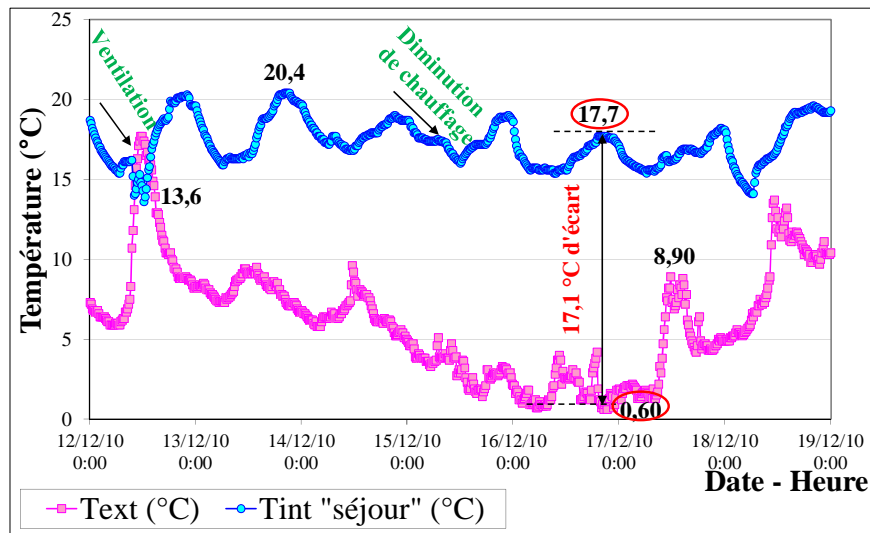


Figure A-1-24 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas du séjour
N.O/S.E, semaine d'hiver « maison en plaques de plâtre »

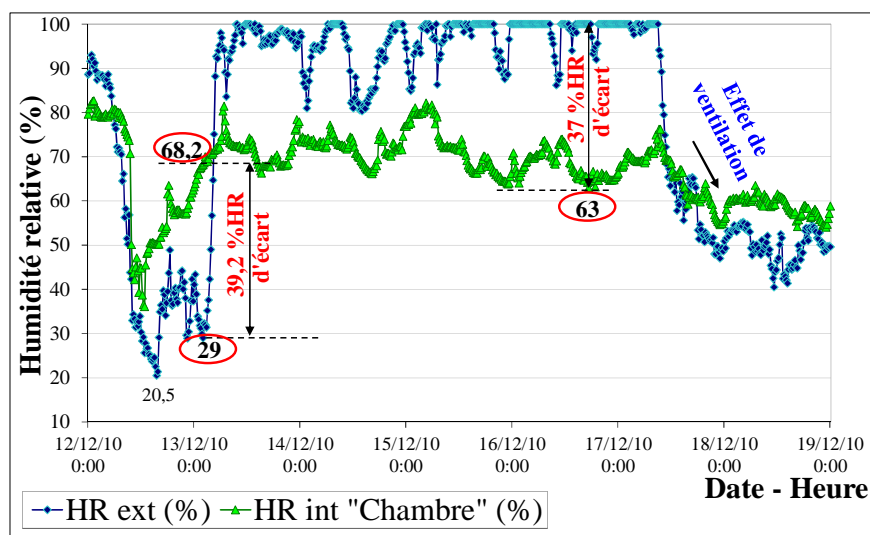


Figure A-1-25 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de la
chambre N.O, semaine d'hiver «Maison plaques de plâtre»

Remarquant que la variation de la température intérieure suit la variation de l'humidité spécifique intérieure. A chaque élévation de l'humidité spécifique intérieure, la température intérieure augmente (Figure A-1-26). En raison de la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur, la pression partielle de la vapeur à l'intérieur sera plus élevée à celle de l'extérieur (exemple à 20°C de température intérieure on a 1169 Pa et à 10 °C de température extérieure 983 Pa) et le flux hydrique va de l'intérieur vers l'extérieur.

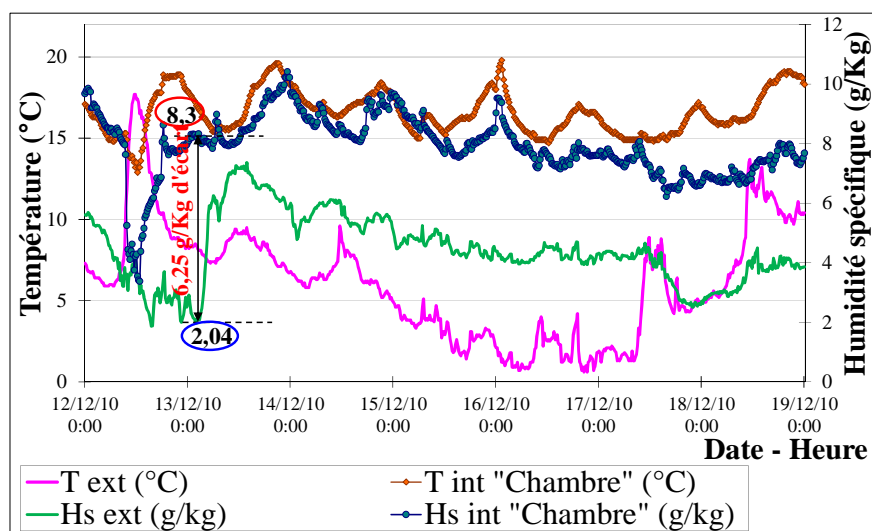


Figure A-1-26 : Variation horaire des températures et des humidités spécifiques intérieures et extérieures : cas de la chambre N.O, semaine d'hiver « maison en plaques de plâtre»

2-4. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période mi-saison

En mi-saison, les températures ambiantes sont plus stables et se situent dans les limites du confort thermique, contrairement aux températures extérieures qui marquent de fortes amplitudes dépassant 11K. Avec l'effet de la ventilation, les amortissements de l'onde thermique sont faibles pour des temps de déphasage courts (Figure A-1-27).

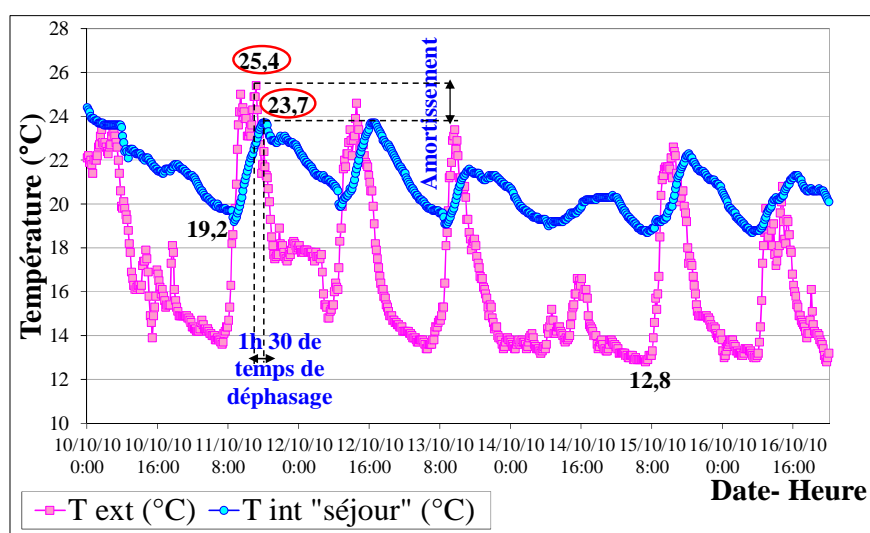


Figure A-1-27: Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de séjour, semaine de mi-saison « maison en plaques de plâtre»

La ventilation cause également l'élévation de l'humidité relative ambiante dépassant les limites du confort, mais qui reste inférieure à l'humidité relative externe, avec un écart max de 32,4%HR (Figure A-1-28). Nonobstant, l'humidité spécifique interne, en retraçant la variation de la température ambiante, dépasse l'humidité spécifique externe avec un écart max de 3,16 g/Kg (Figure A-1-29).

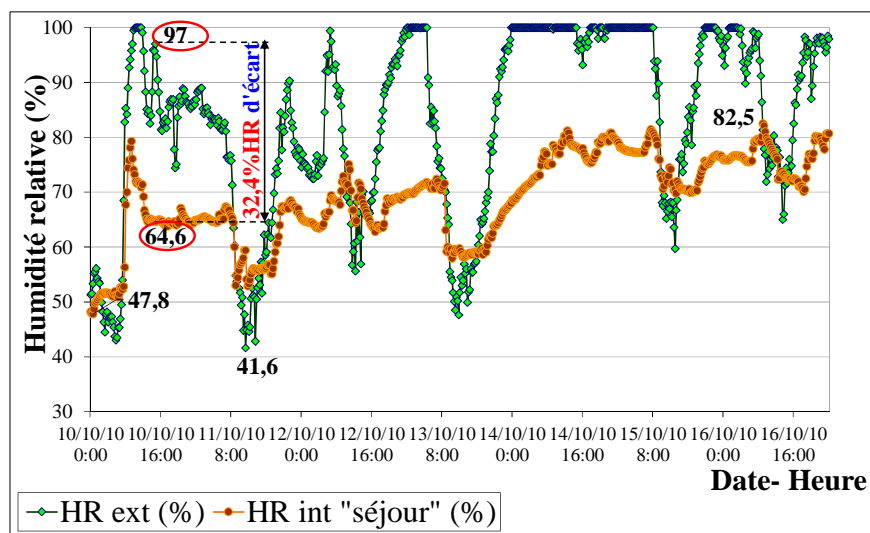


Figure A-1-28 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de séjour, semaine de mi-saison « maison en plaques de plâtre »

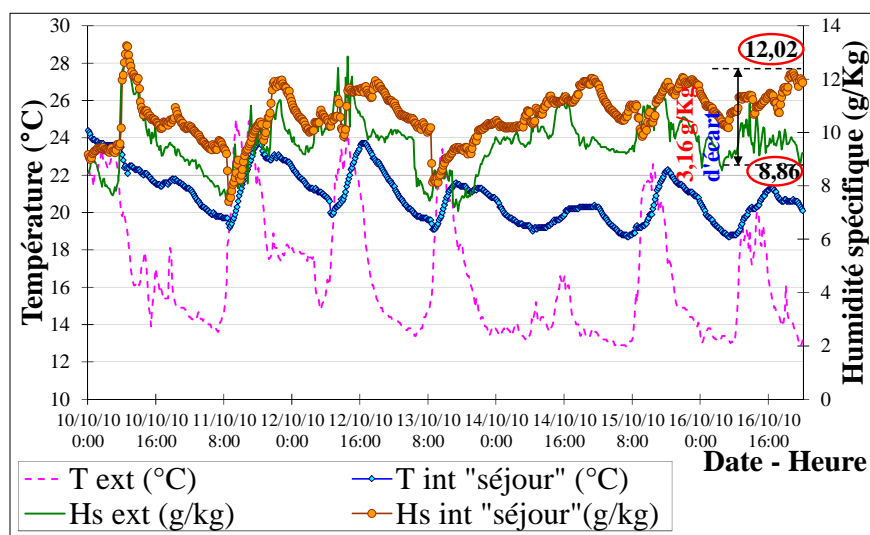


Figure A-1-29 : Variation horaire des températures et des humidités spécifiques, intérieures et extérieures : cas de séjour, semaine de mi-saison « maison en plaques de plâtre »

3. Maison à ossature bois à Treignac (France)

3-1. Caractérisation climatique de l'aire d'étude

3-1-1. Paramètres climatiques

Ussanges est située à Treignac dans le département de la Corrèze (19), la région du Limousin, entre 45°32 de longitude Nord et 1°50 de longitude Est. Son climat est de type océanique, de transition subhumide, repéré dans la zone climatique H1c à une altitude 564 m (Figure A-1-30). L'influence continentale sur la région, bien qu'atténuée, donne lieu à des hivers froids, plus ou moins humides et davantage exposés au gel, et à des étés chauds et orageux. Le climat devient nettement plus sec, les reliefs montagneux arrêtent une grande partie des précipitations. L'amplitude thermique est très forte.

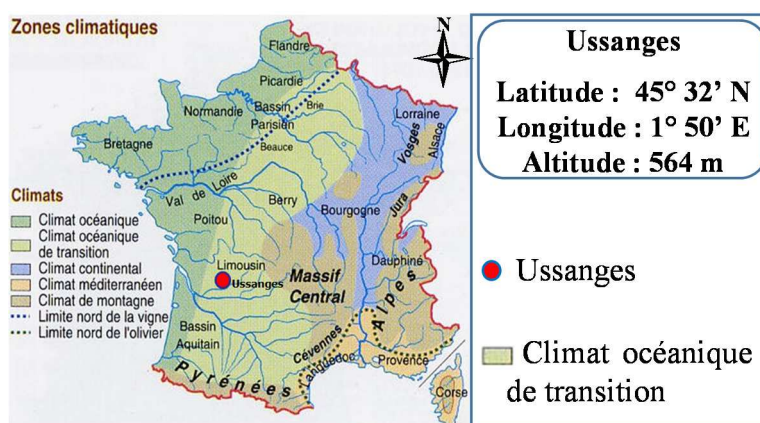


Figure A-1-30 : Situation climatique d'Ussanges (Treignac) (Source : alertes-meteo.com)

3-1-2. Etude bioclimatique

L'impossibilité d'accéder aux données météorologiques d'Ussanges a fait que l'étude bioclimatique s'est limitée uniquement sur l'établissement de son diagramme solaire (Figure A-1-31). Ce dernier montre les trajectoires solaires mensuelles qui sont plus courbées que celles des diagrammes solaires algériens, donc moins d'heures d'ensoleillement sur l'année.

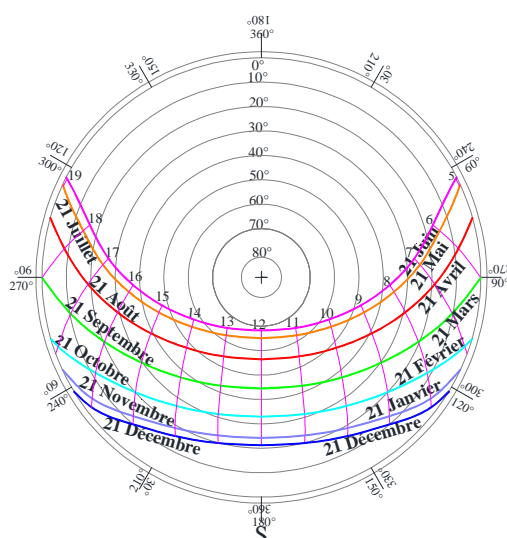


Figure A-1-31: Diagramme solaire d'Ussanges

3-1-3. Microclimat

L'aire d'étude est de type villageois très peu dense, où la condensation de la végétation sous forme d'arbres, exploitations agricoles et jardins près des quelques maisons existantes. L'altitude et le couvert végétal influent énormément sur le microclimat de la région. Ils génèrent sur l'année des températures fraîches et humides.

3-2. Analyse du niveau de confort hygrothermique de la maison

L'application de la norme Européenne (l'équation (II.4)) pour le calcul de la température de confort de la région d'Ussanges donne une faible température de 16,5°C l'hiver et 24,4°C l'été avec une gamme adaptative entre 14,5 et 26,4°C sur le cycle annuel. Par rapport aux limites du confort d'été, les espaces internes sont jugés acceptables. La limite supérieure de confort est dépassée jusqu'à 3,6°C les jours de chauffe (Figure A-1-32).

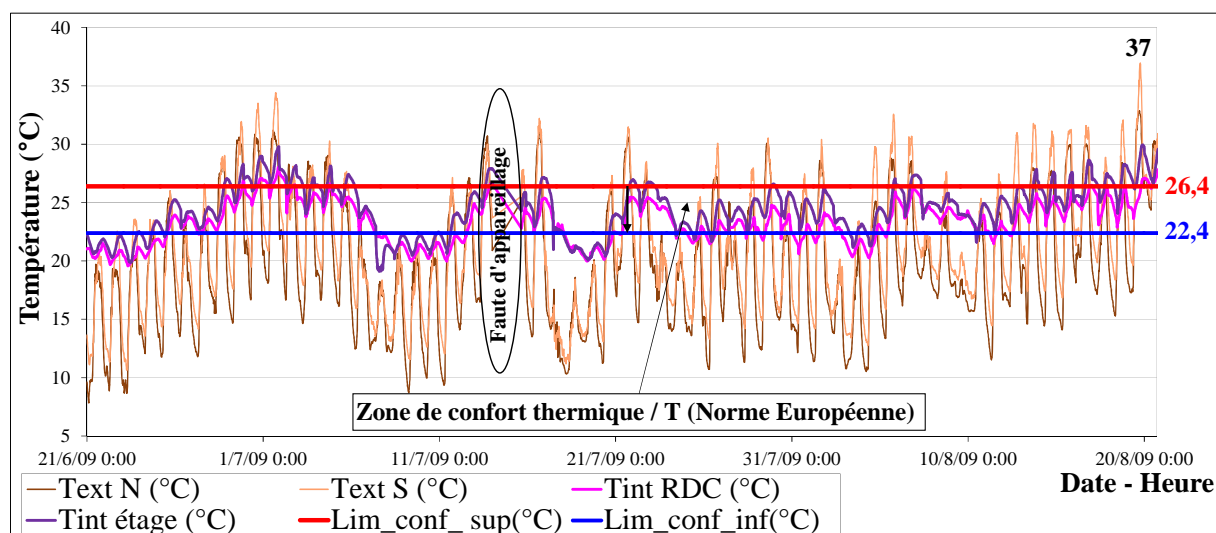


Figure A-1-32 : Comparaison des températures extérieures N, S et intérieures dans le séjour N et la chambre S avec les limites de confort / T de la norme Européenne: Eté « maison OSB »

En humidité relative, les ambiances internes (séjour et chambre) se trouvent avec la limite supérieure de la norme d'ASHRAE, (2010). En raison du climat humide les humidités relatives extérieures dépassent largement cette limite supérieure (Figure A-1-33).

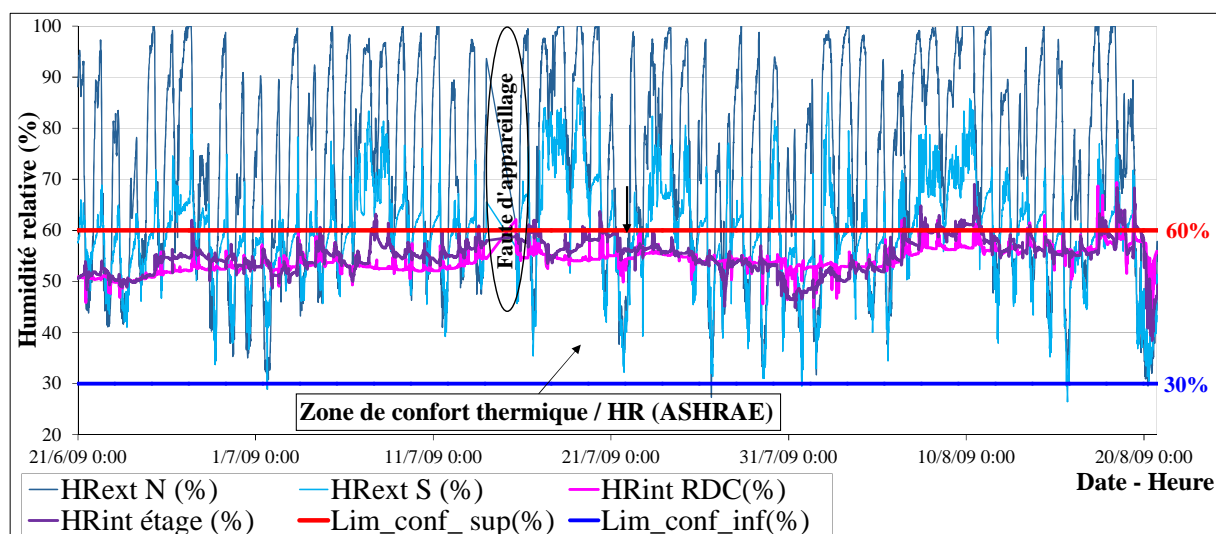


Figure A-1-33 : Comparaison des humidités relatives extérieures N, S et intérieures dans le séjour N et la chambre S avec les limites de confort/HR d'ASHRAE : Eté « maison OSB »

3-3. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période hiver

Comparée à celle de l'extérieur, la température dans le séjour est supérieure de 29 °C max, et plus stable, d'une amplitude moyenne max de 5,1°C. Elle chute la nuit après 22h jusqu'à 9h du matin suite à la diminution du radiateur électrique. La programmation de confort 16-19°C

est anticipée le soir jusqu'à 24°C (Figure A-1-34). L'humidité relative intérieure est aussi très stable en raison du pare-vapeur qui évite les échanges hydriques avec l'extérieur. L'utilisation du chauffage permet encore la stabilisation de l'humidité ambiante. L'humidité externe, en hiver, dépasse pour tout le temps celle de l'intérieur, avec un écart max de 61%.

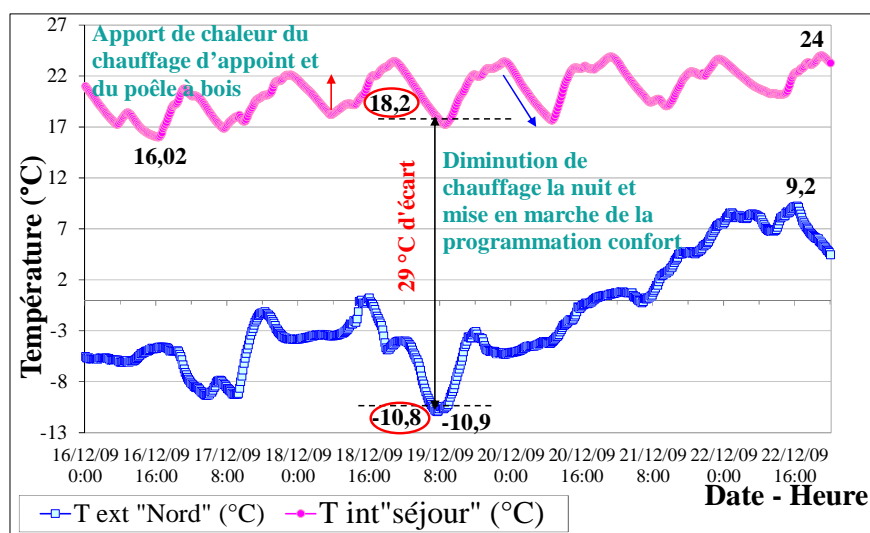


Figure A-1-34 : Variation horaire de température intérieure et extérieure : cas de séjour, période hivernale « maison à ossature bois »

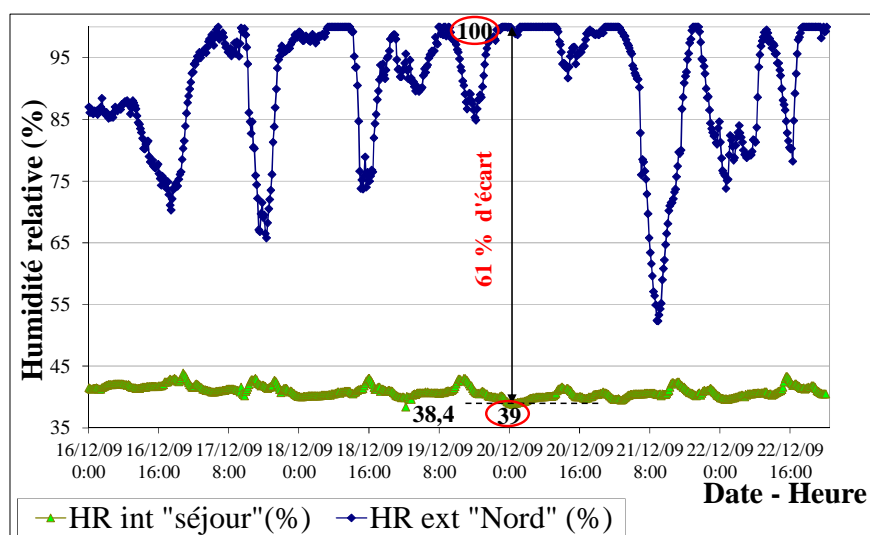


Figure A-1-35 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de séjour, période hivernale « maison à ossature bois »

La variation de la température ambiante dans le séjour suit parfaitement la variation de l'humidité spécifique interne (Figure A-1-36). L'humidité générée par la ventilation mécanique fait augmenter la température de l'air ambiant.

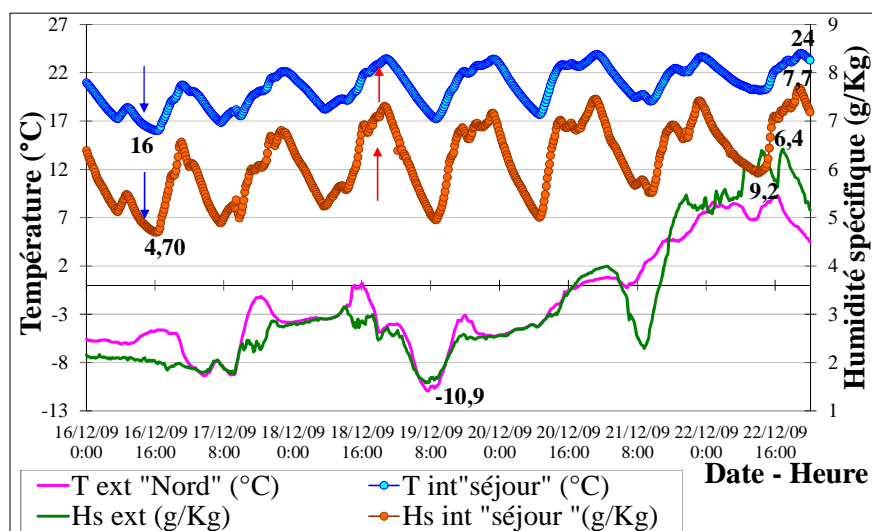


Figure A-1-36 : Variation horaire de la température et l'humidité spécifique, intérieures et extérieures : cas de séjour, période hivernale « maison à ossature bois »

3-4. Etude des températures et hygrométrie de l'air : Période mi-saison

En mi-saison, les températures ambiantes dans le séjour N sont plus stables que celles prélevées dans la chambre S. La température extérieure contrairement à celle ambiante marque de fortes amplitudes dépassant 15K. Au cas du séjour, les amortissements de l'onde thermique, sont faibles pour des temps de déphasage longs (5h), et au cas de la chambre les amortissements sont plus importants pour des déphasages courts (Figure A-1-37, A-38).

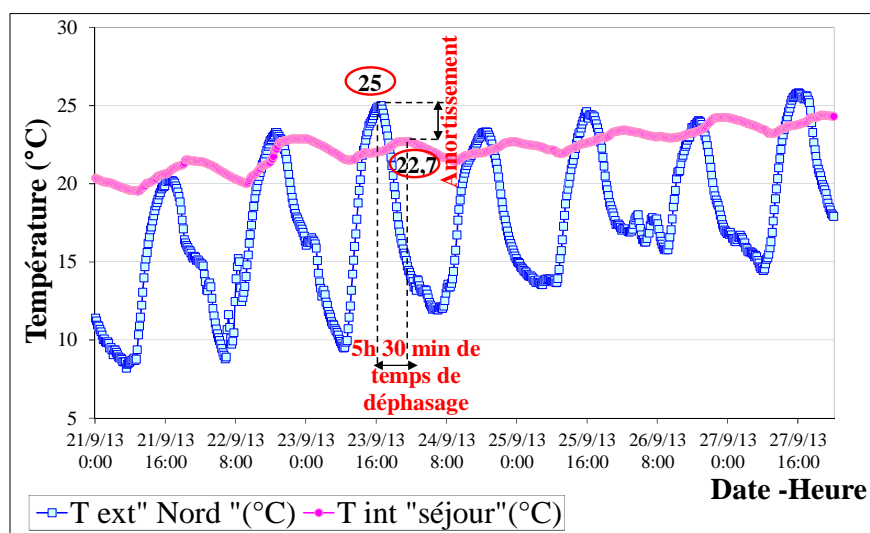


Figure A-1-37 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de séjour, période mi-saison « maison à ossature bois »

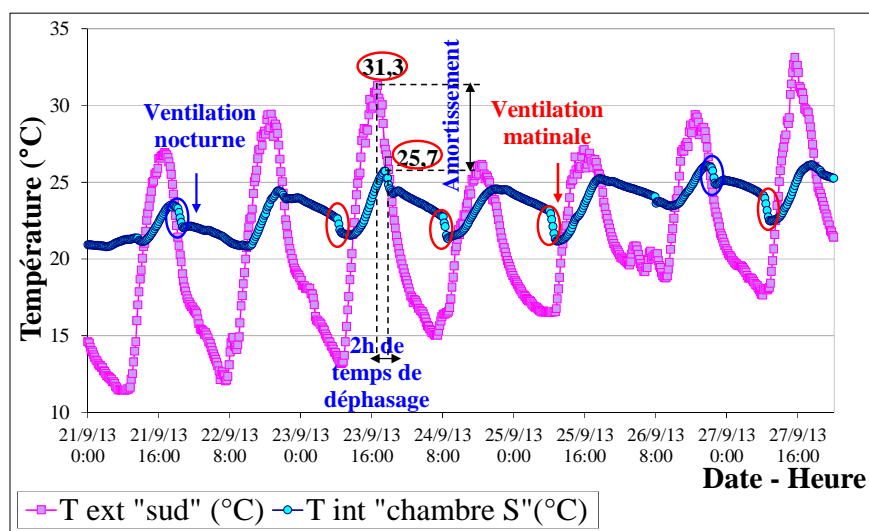


Figure A-1-38 : Variation horaire de la température intérieure et extérieure : cas de la chambre sud, période mi-saison « maison à ossature bois »

Les phénomènes de l'inertie thermique, d'amortissement et de déphasage sont alors influencés par l'orientation et le taux de ventilation. La chambre donne sur le sud et profite de la ventilation matinale et nocturne. L'occupant est le premier acteur agissant sur le confort de son ambiance, modifiant ainsi sa température ou son enthalpie.

L'humidité relative ambiante, par rapport à celle de l'extérieur, est très stable à cause du pare-vapeur/pare-air, marquant un écart max de 47,7%HR (Figure A-1-39). La stabilité est aussi remarquée pour le cas de l'humidité spécifique qui reste inférieure à celle de l'extérieur, avec un maximum de 6,5 g/Kg (Figure A-1-40).

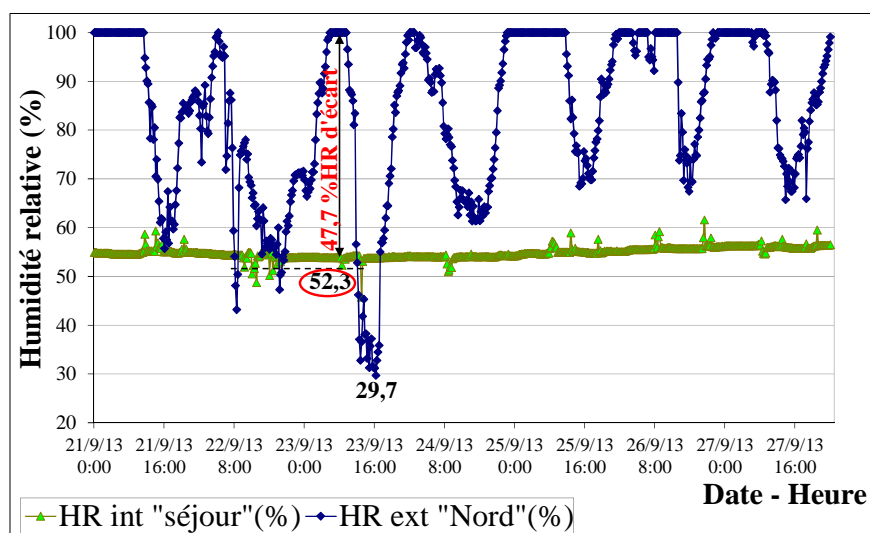


Figure A-1-39 : Variation horaire de l'humidité relative intérieure et extérieure : cas de séjour, période mi-saison « maison à ossature bois »

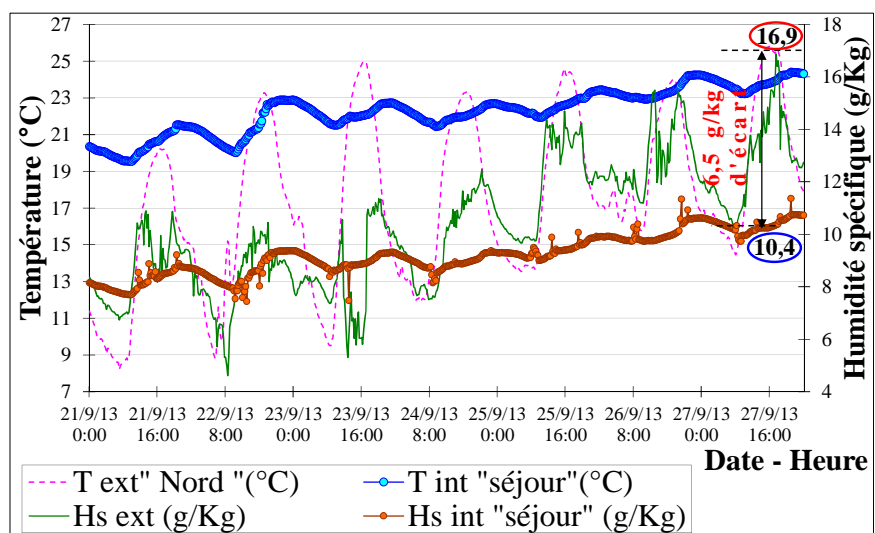


Figure A-1-40 : Variation horaire de la température et l'humidité spécifique intérieures et extérieures : cas de séjour, période mi-saison « maison à ossature bois »

A-2 : Consommation énergétique et apports internes**Tableau A-2-1 : Nombre et type de chauffages utilisés**

| Maison | à gaz naturel | à gaz butane | électrique | Poêle à bois |
|------------------|---------------|--------------|------------|--------------|
| Terre/paille | | 02 | | |
| Pierre | 01 | | | |
| Plaque de plâtre | 01 | | | |
| Ossature bois | | | 01 | 01 |

Tableau A-2-2 : Equipements des maisons

| Equipements | M. Terre/paille | M. Pierre | M. PP | M. OSB |
|--------------------------------|-----------------|-----------|-------|--------|
| Séjour et chambres | | | | |
| TV | 02 | 02 | 01 | 02 |
| Ventilateur | 02 | | | |
| Magnétoscope | | 01 | 01 | 01 |
| Décodeur (Démo) | 01 | 02 | 01 | 01 |
| Chaîne HIFI - Radio | | | 01 | |
| Console de jeux | | 01 | 01 | 01 |
| Ordinateur | | 04 | 01 | |
| Scanner | | 02 | | |
| Imprimante | | 02 | 01 | |
| Sèche-cheveux | 01 | 01 | 01 | 01 |
| Cuisine | | | | |
| Réfrigérateur avec congélateur | 01 | 01 | 01 | |
| Réfrigérateur | | | | 01 |
| congélateur | | | | 01 |
| Four électrique | | 01 | | |
| Four à gaz | | 01 | | |
| Plaque de cuisson électrique | | | | 01 |
| Plaque de cuisson gaz | | 01 | | |
| Lave-vaisselle | | | | 01 |
| Micro-ondes | | 01 | | 01 |
| Cafetière électrique | | 01 | | 01 |
| Robot multifonctions | 01 | 01 | 01 | 01 |
| Buanderie/Cour/Cave | | | | |
| Lave-linge | | 01 | 01 | 01 |
| Sèche-linge | | | | 01 |
| Fer à repasser | 01 | 01 | 01 | 01 |
| Moteur à pomper l'eau | | 01 | | |

Tableau A-2-3 : Eclairage

| Maison | Lieu | Nombre et type d'ampoules utilisées | | | |
|------------------|-----------------|-------------------------------------|----------|------------|-----------|
| | | Classique | allogène | Economique | Type fluo |
| Terre et paille | Séjour | 03 | | | |
| | Chambre1 | 02 | | | |
| | Chambre2 | 01 | | | |
| | Chambre3 | 02 | | | |
| | Cuisine | | | | 01 |
| | Arrière Cuisine | | | | 01 |
| | Cour1 | 01 | | | |
| | Cour2 | 01 | | | |
| | W.C1 | 01 | | | |
| | W.C2 | 01 | | | |
| Pierre | Séjour | 04 | | 01 | |
| | S.A.M | 03 | | | |
| | Chambre1 | 01 | | 01 | |
| | Chambre2 | 01 | | | |
| | Cuisine | | | | 01 |
| | Couloir | 01 | | | |
| | S.D.B | | | | 01 |
| | W.C | 01 | | | |
| | Cave | 01 | | | |
| Plaque de plâtre | Séjour | 04 | | | |
| | Chambre1 | 01 | | 01 | |
| | Chambre2 | 01 | | | |
| | Chambre3 | 01 | | | |
| | Couloir 1 | 01 | | | |
| | Couloir 2 | 01 | | | |
| | S.D.B | | | | 02 |
| | W.C | 01 | | | |
| | Extérieur | | 01 | | |
| Ossature bois | Séjour/S.A. M | | | 03 | |
| | Chambre1 | | | 01 | |
| | Chambre2 | | | 01 | |
| | Bureau | | | 01 | |
| | Dressing 1 | | | 01 | |
| | Dressing 2 | | | 01 | |
| | Entrée | | | 01 | |
| | Cuisine | | | | 02 |
| | S.D.B | | | | 01 |
| | W.C 1 | | | 01 | |
| | W.C 2 | | | 01 | |
| | Extérieur | | 01 | | |

Tableau A-2-4 : Production de l'eau chaude sanitaire

| Equipement | M. Terre/paille | M. Pierre | M. PP | M. OSB |
|-----------------------------------|-----------------|-----------|-------|---|
| Chauffe bain à gaz de ville | - | 01 | 01 | |
| Ballon électrique/thermodynamique | - | - | - | 01 (200 litres 2/3 solaire* 1/3 appoint gaz solaire (CESI) 3m ² de capteurs vitrés |
| Pompe à chaleur (PAC) | - | - | - | 01 |

*Base de calcul 33 litres par personne et par jour (x 1,5 pour eau chaude solaire)

Tableau A-2-5 : Membres et scénarios d'occupation par jour de semaine

| Maison | Nombre d'occupants / Horaire d'occupation | | | | |
|---------------------|---|-----------------------------------|------------------|---------------------------------|---------------------------|
| | Séjour | S.A.M | Chambre1 | Chambre 2 | Chambre 3 |
| Terre/paille | 04 p/de 13h à 16h de 22h à 7h | - | 01p/ de 22h à 7h | 04 p / de 13h à 16h de 22h à 7h | Selon le nombre d'invités |
| Pierre | 02p de 22h à 7h | 04p/ de 12h à 16h de 17h à 22h | 01p/ de 22h à 6h | 01 de 00h à 7h | - |
| PP | 04p/de 13h à 16h de 19h à 22h | - | 02p/ de 22h à 6h | 01p/ de 22h à 7h | 01p/ de 22h à 7h |
| OSB | 03p / de 07 à 8h de 19h à 22h | | 02p/ de 22h à 7h | 01p/ de 22h à 7h | - |

* Les week-ends, l'occupation dans les chambres est rajoutée de 2h le matin.

Tableau A-2-6 : Programme d'ouverture et de fermeture des fenêtres - période été

| Maison | Persienne | | vitre | |
|---------------------|--|--|--|--|
| | Heure d'ouverture | Heure de fermeture | Heure d'ouverture | Heure de fermeture |
| Terre/paille | 18h-5h 8h-10h | 5h-8h 10h-18h | 18h-10h | 10h-18h |
| Pierre | 18h-20h 9h-10h (1/2 ou 1/4 ouvertes) | 20h-9h 10h-18h | 18h-10h | 10h-18h |
| PP | 18h-5h 8h-10h | 5h-8h 10h-18h | 18h-10h | 10h-18h |
| OSB | 7h30-9h (sér.) 20h30-22h (sér.) 10h-11h (ch.) 21h-23h (ch.) | 22h-7h30(sér.) 11h-20h-30(sér.) 23h-10h (ch.) 11h-21h (ch.) | 7h30-9h (sér.) 20h30-22h (sér.) 10h-11h (ch.) 21h-23h (ch.) | 22h-7h30(sér.) 11h-20h-30(sér.) 23h-10h (ch.) 11h-21h (ch.) |

Tableau A-2-7 : Programme d'ouverture et de fermeture des fenêtres - période hiver

| Maison | Persienne | | vitre | |
|---------------------|--|--------------------|-------------------|--|
| | Heure d'ouverture | Heure de fermeture | Heure d'ouverture | Heure de fermeture |
| Terre/paille | 15h-17h 9h-13h | 13h-15h 17h-9h | 9h-10h | 10h-17h 17h-9h |
| Pierre | 15h-17h 9h-13h (1/2 ou 1/4 ouvertes) | 13h-15h 17h-9h | 9h-10h | 10h-17h 17h-9h |
| PP | 9h-17h (sér.) 9h-10h (ch.) 15h-17h (ch.) | 13h-15h 17h-9h | 9h-10h | 10h-17h 17h-9h |
| OSB | 8h-17h (sér.) 10h-17h (ch.) | 17h-8h 17h-10h | - | vitres gardées fermées toute la journée |

Apports des occupants

Il est assumé pour chaque occupant que le transfert de chaleur de convection est 65 W, avec un transfert thermique de rayonnement de 36 W, et un taux de production de vapeur d'eau de 43g/h (base de données, WUFI plus v2.1). Pour le métabolisme de base, la méthode de calcul la plus simple est la formule de Harris et Benedict, recalculée par Roza et Shizgal (1994) en mettant au point deux formules, une pour les femmes et une pour les hommes.

- Femmes : $MB = 9,740 \times P + 172,9 \times T - 4,737 \times A + 667,051$
- Hommes : $MB = 13,707 \times P + 492,3 \times T - 6,673 \times A + 77,607$

MB =Métabolisme de Base (Calories); P = Poids (kg); T = Taille (m); A =Age (ans). (A poids, taille et âge égal, les hommes ont un métabolisme de base plus important que les femmes. Plus on est grand et lourd, plus on dépense de l'énergie. Avec l'âge, le métabolisme basal diminue).

Tableau A-2-8 : Apports des électroménagers

| Appareils | Puissance (W) | Consommations | |
|----------------------------|-----------------|---------------|------------------|
| Lave-vaisselle | | 1,05 Wh/cycle | 6 cycles/semaine |
| Lave-linge | | 0,85 Wh/cycle | 6 cycles/semaine |
| Réfrigérateur seul | | 190Wh/an | - |
| Télévision | 130 W/4W veille | | 4h / jour |
| Magnétoscope/DVD | 130 W/4W veille | | 4h / jour |
| Ordinateur+ imprimante | 250 W | | 1h / jour |
| Cuisson plaque à induction | 25000 W | | 0.85h / jour |
| Four électrique catalyse | 2600 W | | 1h / semaine |
| Four micro-ondes | 750 W | | 0.25h / jour |

Appareils en veille : télévision; magnétoscope; 3 réveils ; téléphone ; micro-onde, hifi=8×4W

A-3 : Calcul du flux solaire pour le fichier météo des modèles TRNSYS

1. Position du problème

Le fichier météo à introduire dans les modèles de simulation TRNSYS des maisons investiguées en Algérie (terre/paille, pierre) devait inclure tous les paramètres climatiques du site (T, HR, insolation...). Or, les flux solaires incidents au niveau des aires d'étude n'ont pas été mesurés. Il s'agit donc de créer des scénarios d'insolation aussi réalistes que possible à partir des différentes données possédées.

1-1-1. Cas du fichier météo de Guelma :

Les données possédées concernent :

- Des **enregistrements réels** de température et d'hygrométrie extérieure, effectués au niveau de la cour de la maison ;
- Des **enregistrements réels** de la période étudiée provenant de la station météorologique de Guelma, située à 05Km de la maison (Figure A-3-1). Les mêmes enregistrements sur de longues périodes provenant de la même station, téléchargeables depuis les sites [Freemeteo.fr](http://freemeteo.fr) et infoclimat.fr. Les données concernent la température, les précipitations (en mm) et des informations sur les conditions météo sous forme texte. Le rayonnement solaire n'est pas en revanche indiqué. Dans les stations météorologiques algériennes on mesure plutôt la durée d'insolation à l'aide de l'héliographe de Campbell-Stokes, comportant une boule de verre et fonctionnant selon le principe de la loupe. Il permet de mesurer la durée pendant laquelle le rayonnement solaire direct a une puissance suffisante (en pratique plus de 120 W/m²) pour brûler ou décolorer une bande de papier changée chaque jour. La mesure de la longueur des parties brûlées permet de calculer la durée d'insolation. Pour en déduire l'irradiation, on utilise des corrélations. Quant à l'état du ciel, il est vérifié à vue d'œil en évaluant la couverture nuageuse en octa¹ (Figure A-3-2) ;
- Un fichier .TM2 de scénario **d'année type** pour la ville de Constantine : Ce fichier comprend les valeurs au pas horaire des températures extérieures, de l'humidité relative, et du flux solaire total incident sur une surface horizontale.

¹ L'octa: unité de mesure en météorologie, correspond à une fraction de 1/8^{ème} de la voûte céleste. Un ciel parfaitement clair est indiqué par la valeur de 0 octa, alors qu'un ciel complètement couvert est estimé à 8 octas. La valeur spéciale de 9 octas est utilisée quand on ne peut observer le ciel - par exemple, en cas de brouillard.



Figure A-3-1 : Situation de la maison en pierre par rapport à la station météorologique

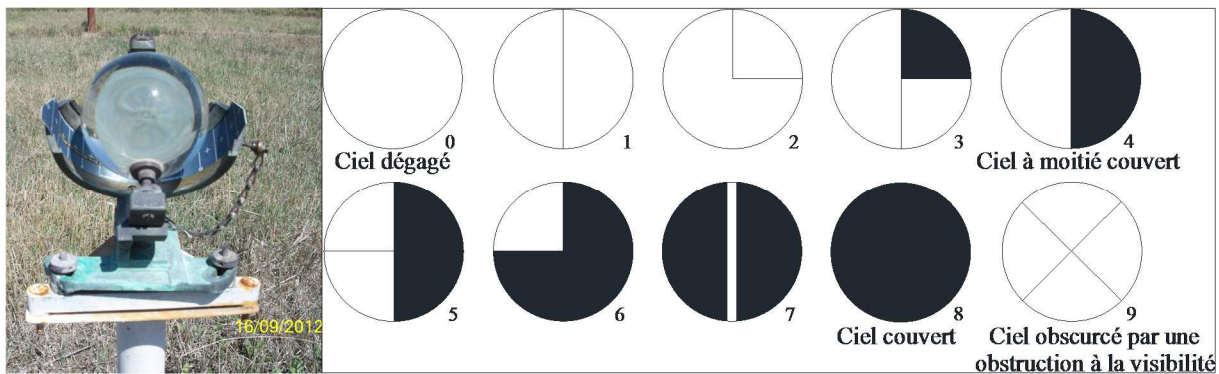


Figure A-3-2 : L'héliographe pour la mesure de la durée d'insolation, et carte de symboles évaluant l'état du ciel (couverture nuageuse) en octats

L'idée pour synthétiser un scénario d'ensoleillement était d'exploiter **l'amplitude thermique journalière** ($T_{\max} - T_{\min}$) sur la période étudiée, en utilisant une corrélation avec l'ensoleillement, établit à partir de l'année type de Constantine.

1-1-1.1 Analyse du scénario météo type de Constantine

Le but étant d'effectuer une corrélation entre l'amplitude thermique quotidienne et l'énergie solaire incidente journalière.

Le fichier des données Conshour.tm2 est lu depuis TRNSYS pour générer un fichier texte avec des températures, humidité relative et flux solaire horizontal global au pas horaire (TRNSYS donne le flux en kJ/h.m^2 , ses valeurs ont été donc divisées par 3,6 pour les exprimer en Watt). Ce fichier texte est ensuite importé sous Excel. Le flux théorique par temps dégagé est également calculé à partir d'une fonction « FluxSolaireTotal » programmée sous VBA.

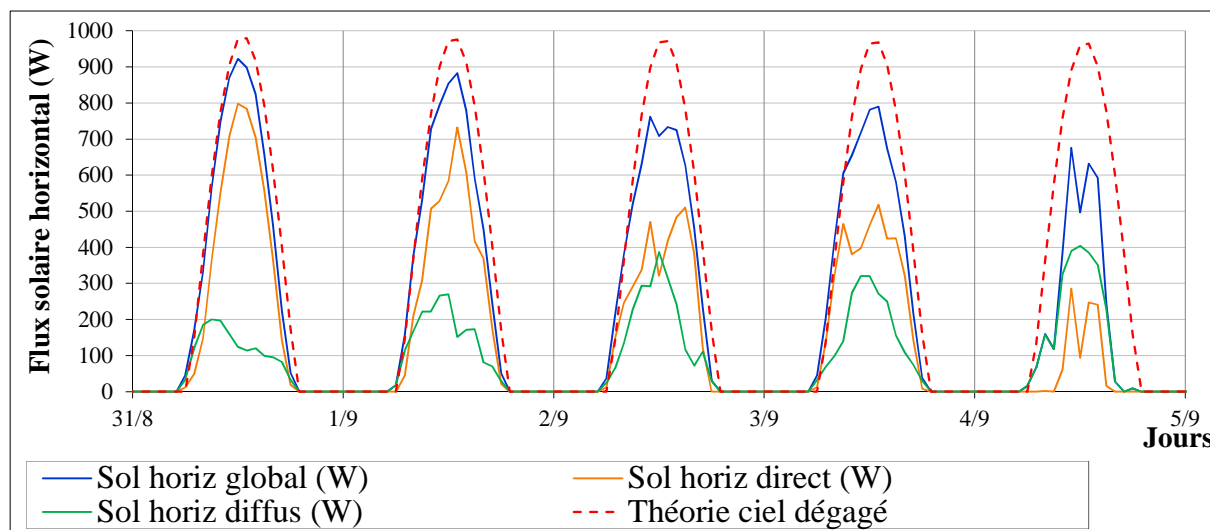


Figure A-3-3 : Différents flux solaires horizontaux du scénario météo brut de Constantine et son flux solaire horizontal théorique par ciel clair

A partir du scénario météo type de Constantine (généré par TRNSYS), les températures maximales et minimales quotidiennes sont calculées. L'énergie solaire globale incidente E_g sur un plan horizontal pendant une journée (en Wh), en valeurs réelles est ainsi évaluée (Figure A-3-4). Egalement les valeurs théoriques par ciel dégagé E_{gth} sont estimées.

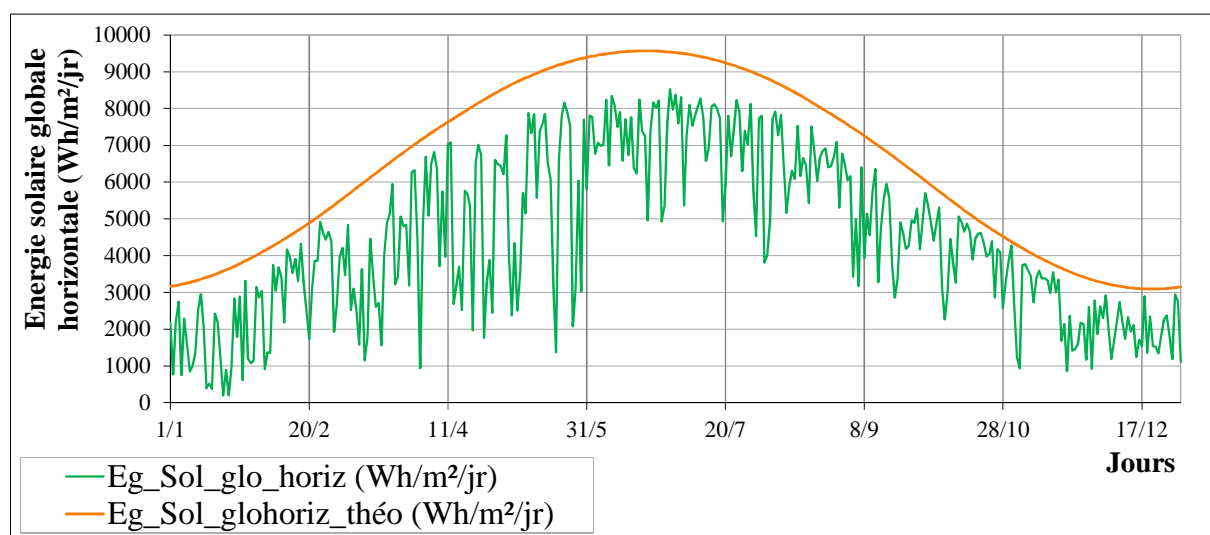


Figure I-3-4: Energie solaire globale horizontale du scénario météo brut et l'énergie solaire globale horizontale théorique de Constantine

En données brutes, un écart est constaté entre la courbe enveloppe théorique et les valeurs maximales de la courbe type de Constantine.

L'Atlas Solaire de l'Algérie donne pour Constantine les énergies incidentes annuelles suivantes :

- Insolation annuelle théorique par ciel clair : $E_{gth} = 2292 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$
- Insolation annuelle réelle moyenne, compte tenu de la nébulosité : $E_g = 1862 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$

L'objectif de la démarche étant d'apporter au bâtiment une quantité solaire annuelle réaliste. Les valeurs du flux solaire sont pondérées par des coefficients identifiés de telle manière que les énergies d'insolation totales correspondent à celles de l'atlas solaire. Ceci donne :

- Coefficient sur le flux théorique par ciel clair : 0.97
- Coefficient sur le flux réel : 1.14

En données ainsi corrigées, l'enveloppe supérieure des évolutions journalières coïncide beaucoup mieux avec la courbe théorique par ciel clair (Figure A-3-5).

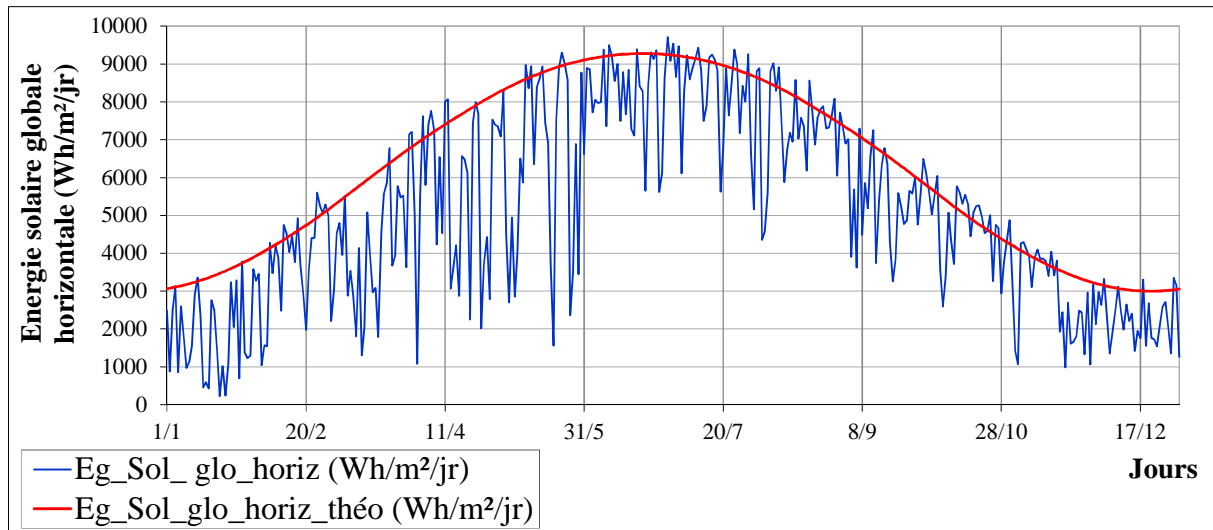


Figure A-3-5 : Scénario annuel d'énergie solaire horizontale journalière et courbe enveloppe théorique en valeurs corrigées, pour Constantine

Il est déduit, pour chaque journée, un facteur de nébulosité $\eta = E_g / E_{gth}$.

Le fait de trouver certains facteurs de nébulosité légèrement supérieurs à 1, n'est pas grossier. Ceci pouvant être dû à la présence de cumulus augmentant le flux solaire par réflexion du rayonnement sur leurs flancs.

Le nuage de points donnant le facteur de nébulosité en fonction de l'amplitude journalière (Figure A-3-6) permet de mettre en évidence une assez bonne corrélation à l'échelle d'une année, qui s'exprime sous la forme d'une loi de proportionnalité :

$$\eta = C\Delta T = 0.0646\Delta T$$

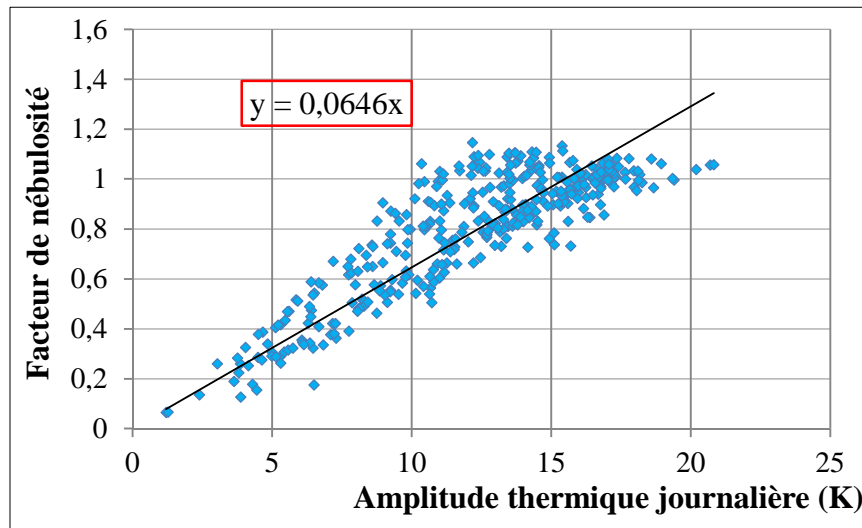
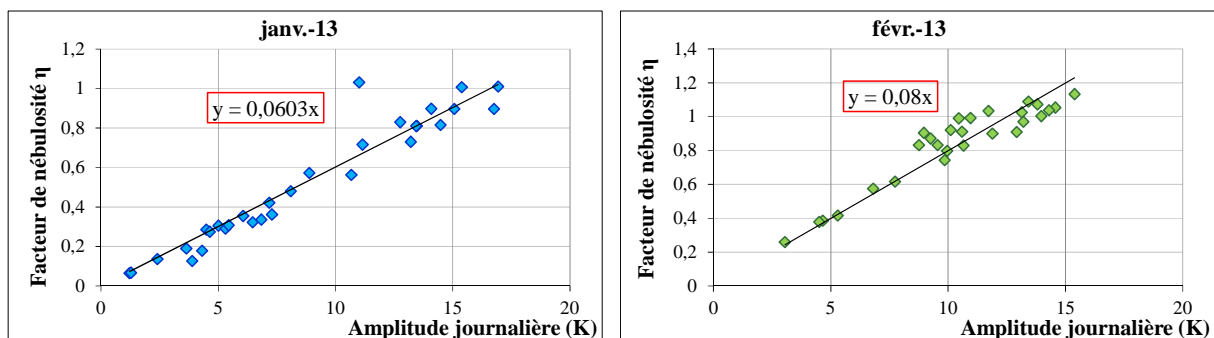


Figure A-3-6 : Corrélation amplitude thermique/facteur de nébulosité sur une année

L'étude de corrélation est reprise mois par mois, afin de mettre en évidence un éventuel effet saisonnier sur la corrélation (Figure A-3-7). Bien que cet effet ne soit pas très significatif, un coefficient de proportionnalité variable est quand même pris, donné par l'équation de la courbe de tendance ci-dessous (Figure A-3-8):



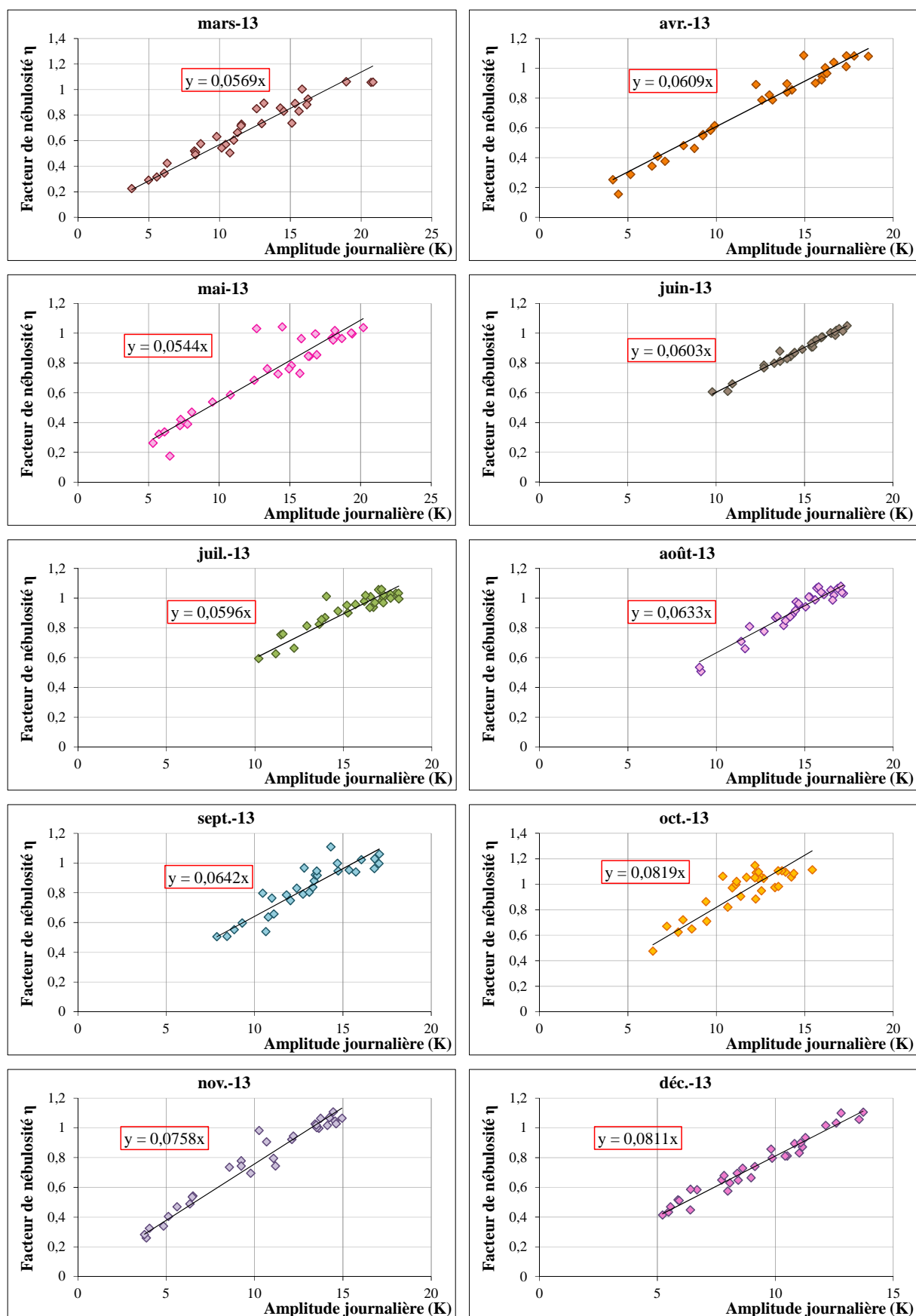


Figure A-3-7 Corrélation amplitude thermique/facteur de nébulosité, mois par mois

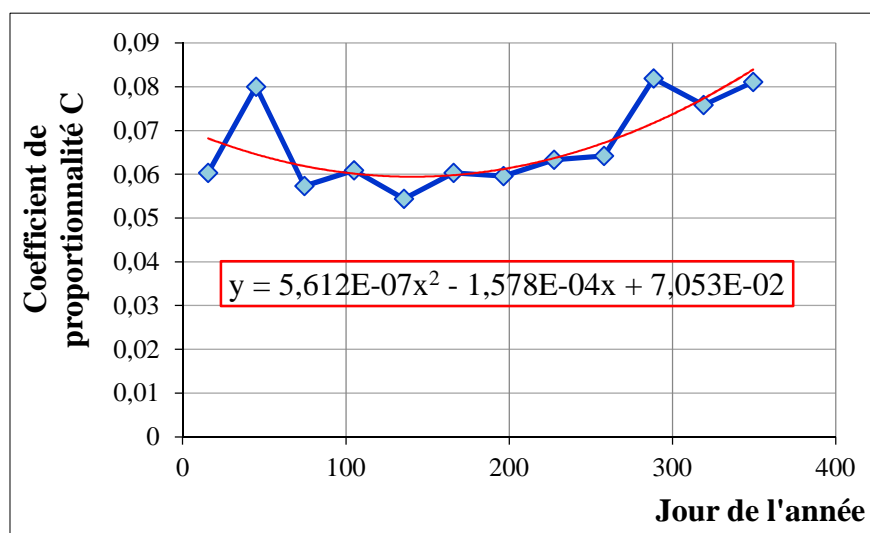


Figure A-3-8 : Variation du coefficient de proportionnalité en fonction du mois

1-1-1-2. Comparaison des profils de température de Constantine et Guelma

La comparaison des profils de températures annuels du **scénario type** de Constantine et celui de **l'année de mesure** de Guelma (Figure A-3-9) montre que les distributions statistiques d'amplitudes thermiques de ces deux fichiers sont assez différentes. Ceci pose le problème de l'amplitude à prendre en compte pour le calcul sur Guelma. En effet, certaines amplitudes de Guelma, notamment estivales, sont très supérieures à celles de Constantine (Figure I-3-10), et l'application de la loi de proportionnalité à de telles amplitudes conduirait à une surévaluation du flux solaire, bien au-delà des valeurs réalistes.

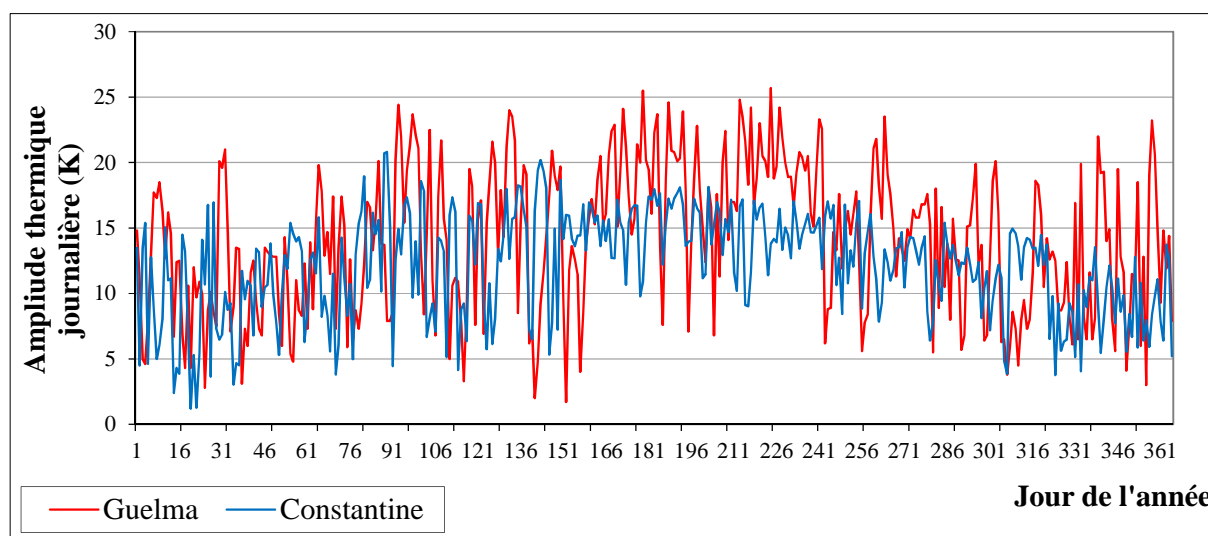


Figure A-3-9 : Variation annuelle des amplitudes journalières à Guelma et Constantine

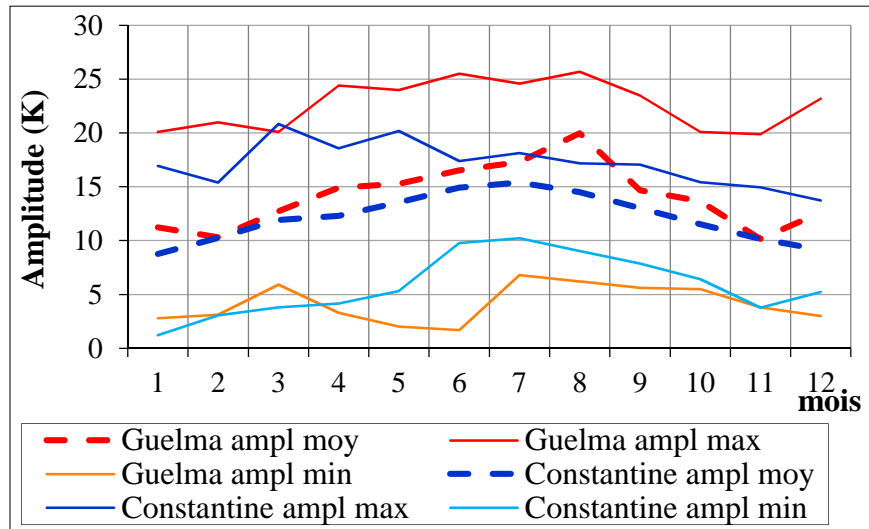


Figure A-3-10 : Statistiques comparées des amplitudes mois par mois

Considérant que les maximums mensuels d'amplitude correspondent probablement à des journées de temps dégagé, une normalisation des amplitudes de Guelma est proposée par le rapport :

$$\alpha = \frac{\Delta T_{\max \text{ mensuelle Const}}}{\Delta T_{\max \text{ mensuelle Guelma}}}$$

La courbe ci-dessous (Figure A-3-11) donne la tendance d'évolution de ce rapport, et l'équation qui sera prise en compte :

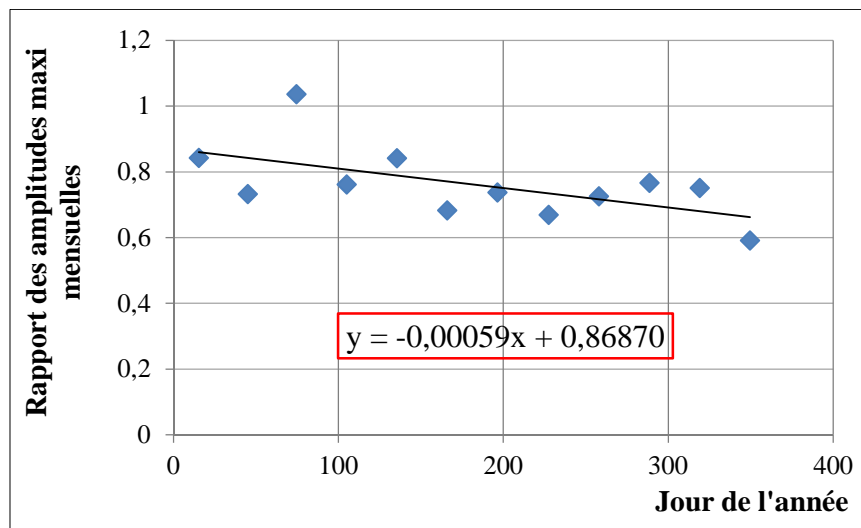


Figure A-3-11 : Evolution du rapport des amplitudes mensuelles maxi Constantine/Guelma

Comme pour Constantine, le flux solaire maximal théorique par temps dégagé calculé pour Guelma est pondéré par un coefficient 0.94, de manière à ce que l'énergie solaire incidente annuelle par ciel clair corresponde à la valeur de l'Atlas Solaire (2200 kWh/m²/an). Ce coefficient est légèrement plus faible que pour Constantine, probablement en raison de la différence d'altitude : Guelma étant plus basse que Constantine, l'atténuation du rayonnement par l'atmosphère y est plus forte.

Le flux solaire horaire calculé pour Guelma sera alors ce flux maximal théorique par temps dégagé, pondéré par le produit $a \times C$ du jour. En termes d'énergies journalières, on obtient les évolutions brutes suivantes (Figure A-3-12):

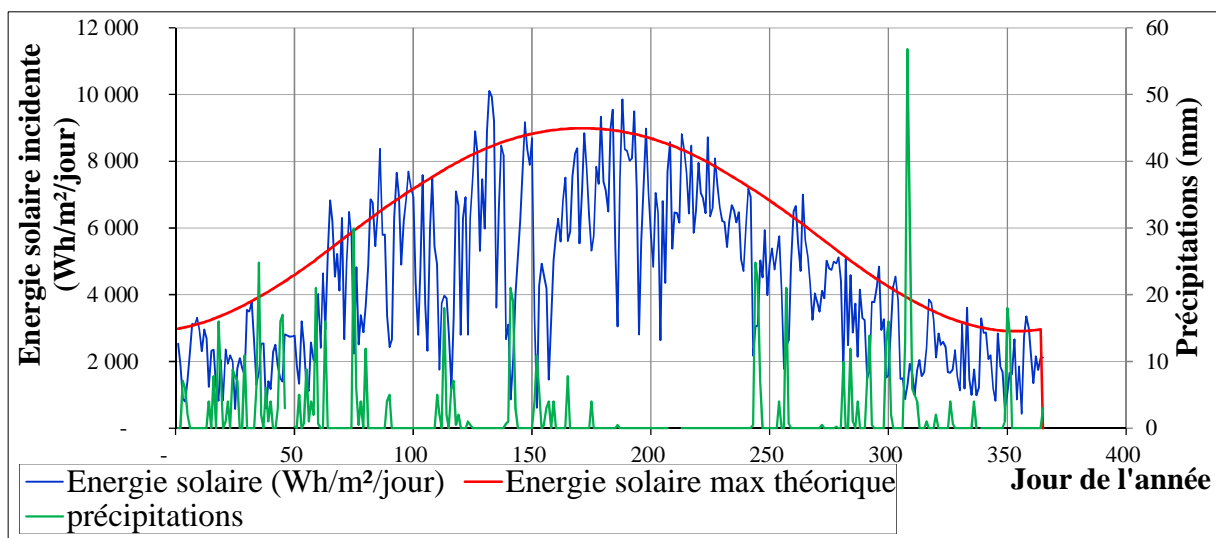


Figure A-3-12 : Energie solaire journalière estimée pour Guelma (formule brute)

Du fait de l'imperfection de la corrélation, il est constaté que l'enveloppe supérieure de la courbe d'énergie, correspondant aux journées de temps dégagé, est beaucoup plus dispersée que celle du fichier type de Constantine. A cet effet une dernière correction a été effectuée par un coefficient d'ajustement de manière à égaler l'énergie solaire annuelle totale et celle donnée par l'Atlas Solaire pour Guelma (1807 kWh/m²/an). Le coefficient ainsi identifié est égal à 1.14.

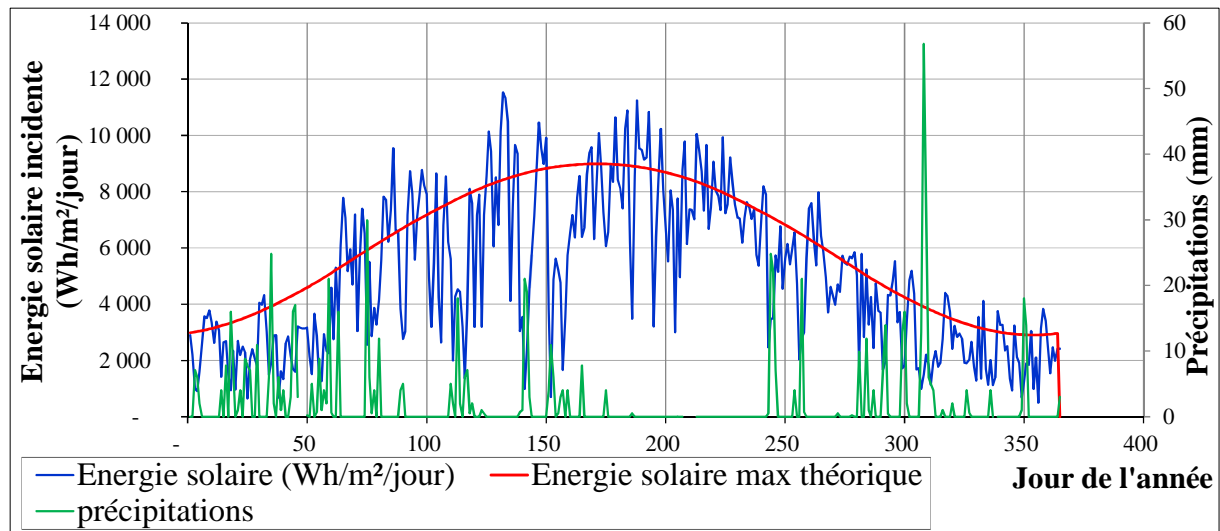


Figure A-3-13 : Energie solaire journalière estimée pour Guelma (formule corrigée)

Il est noté une bonne corrélation entre les périodes de faible ensoleillement (lorsque la courbe bleue est très en dessous de la courbe rouge) et les précipitations. L'étude annuelle se passe relativement bien. Par contre, le large dépassement de la courbe théorique pourra poser des problèmes pour des calculs précis sur des séquences estivales courtes. Un amortissement des variations serait peut-être à considérer afin de réduire ce dépassement lors des périodes de temps dégagé.

La formule de calcul du flux solaire global G (W/m^2) sur une surface horizontale à Guelma sera donc :

$$G = G_{théo} \times 0,94 \times C(j) \times \alpha(j) \times 1,14 \times \Delta T(j)$$

Avec, dans cette expression :

- $G_{théo}$ = flux solaire global théorique par ciel clair, calculé par la fonction VBA « FluxSolaireTotal » pour une inclinaison nulle, et en fonction de la latitude, du jour et de l'heure
- $C(j) = 5,612 \times 10^{-7} j^2 - 1,578 \times 10^{-4} j + 7,053 \times 10^{-2}$,
 j désignant le numéro du jour de l'année
- $\alpha(j) = 0,8687 - 0,00059 \times j$
- $\Delta T(j)$ = amplitude thermique du jour

Ce calcul est effectué pour le pas d'une heure et pour le pas de 1/4 heure. Les valeurs sont ensuite exportées sous la forme d'un fichier texte, pour être lues par TRNSYS.

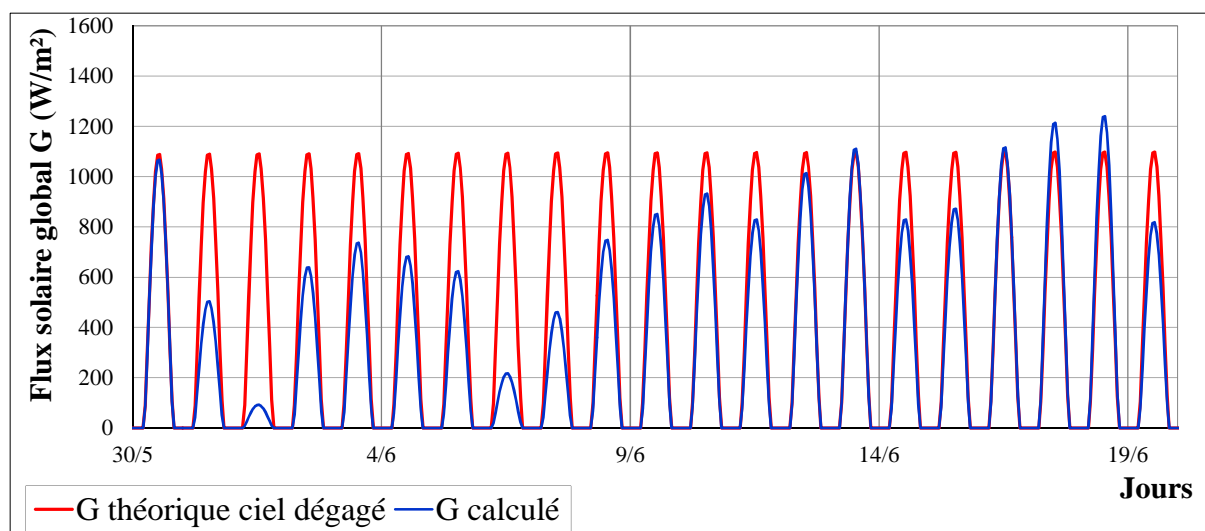


Figure A-3-14 : Exemple de flux calculé, comparé au flux théorique par ciel dégagé (150 à 170 jours)

Bien qu'après l'application de cette méthode (cas de Guelma), les flux solaires réels des régions d'étude ont été téléchargés d'une base de données en ligne, élaborée par MINES ParisTech et Transvalor S.A., 2015. Dans le cadre d'un projet européen, la base de données SoDa de rayonnement solaire, au nom MACC-RAD, a été mise à disposition avec un accès gratuit. La base de données est disponible sur la page :

<http://www.soda-pro.com/web-services/radiation/macc-rad>

La comparaison entre le flux solaire calculé (cas de Guelma) et celui téléchargé de la base de données SoDa montre que la corrélation avec l'amplitude thermique pour synthétiser une insolation tenant compte des nuages n'était pas une idée complètement erronée. De faibles écarts sont notés entre les deux flux pour la plupart du temps (Figure A-3-15).

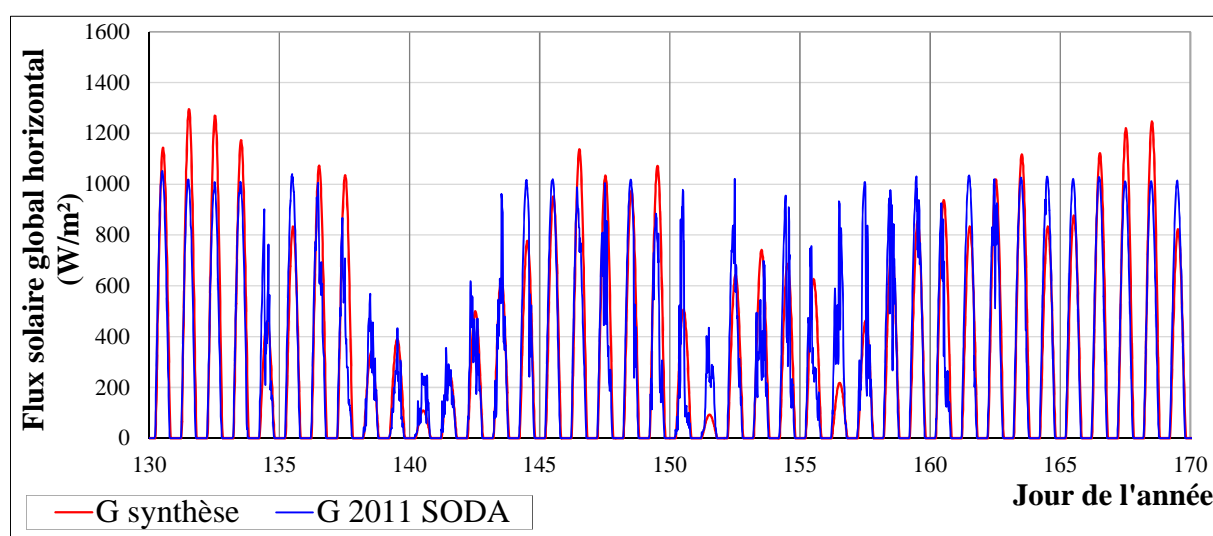


Figure A-3-15 : Corrélation entre flux solaire calculé et celui du site SoDa (130 à 170 jours)

Structure du fichier météo

Le fichier « Meteo Guelma » sous format texte (.txt) est ainsi conditionné pour être lu par TRNSYS avec un lecteur de données (data reader), « Type9 » (dans Utility/Data Readers/Generic Data Files/Skip lines to start/Free format/Type9c). Chaque ligne des données injectées dans ce fichier texte correspond aux intervalles de pas de temps réguliers « de 15 min ». Les colonnes traduisent les paramètres enregistrées, avec la structure suivante :

| | | |
|---------------------------------------|--|--------------------------------|
| T_{ext} mesurée dans la cour | HR_{ext} mesurée dans la cour | Flux solaire global horizontal |
|---------------------------------------|--|--------------------------------|

Les sorties de ce type sont nos variables, dans l'ordre des colonnes du fichier de données. Dans le lecteur de données météo « Type16 », le rayonnement est calculé en fonction de l'angle et de l'inclinaison des murs. Les 'orientations' dans TRNBuild sont des variables connectées à ce lecteur.

A-4. Modèle d'humidité de TRNSYS

1. Modèle simple : capacité effective

Ce modèle consiste à considérer l'impact de l'humidité de l'air et de la surface de l'enveloppe et des meubles. La charge latente exprimant les effets de sorption / capacité HR de l'air à l'échelle de zone dans le TYPE56 de TRNSYS via ce modèle simple se calcule par :

$$M_{\text{eff},i} = \text{Ratio } M_{\text{air},i}$$

$M_{\text{eff},i}$: capacité effective de l'humidité de la zone

$M_{\text{air},i}$: la masse d'air dans la zone

Ratio : facteur de multiplication en général dans la gamme de 1 à 10.

Néanmoins, le manuel de TRNSYS ne fournit pas la formule pour le calcul de ce facteur de multiplication. On a considéré des ratios de 4 pour la cuisine (la plus humide), de 3 pour la salle à manger, de 2 pour le couloir et de 1 pour les pièces (les plus éloignées de la cuisine).

1.1. Équilibre d'humidité de la zone

$$M_{\text{eff},i} = \frac{d\omega_i}{dt} = m_{\text{inf},i} (\omega_a - \omega) + \sum_k^{n_{\text{vent}}} m_{v,k,i} (\omega_{v,k,i} - \omega_i) + W_{g,i} + \sum_{i-j}^{\text{surfaces}} m_{\text{cplg},s} (\omega_j - \omega_i)$$

Avec :

$M_{\text{eff},i}$: capacité effective de l'humidité de la zone

ω_i : taux d'humidité de la zone

ω_a : taux d'humidité ambiante,

$\omega_{v,k,i}$: taux d'humidité de l'air de ventilation de type ventilation k

$W_{g,i}$: gains d'humidité interne

ω_j : taux d'humidité d'une zone adjacente j

Variation HR zone production instantanée $\bar{\omega}_i = \omega_{\tau,i}$

$$Q_{lat,i} = h_v \left(\dot{m}_{inf,i} (\omega_a - \omega_{req,i}) + \sum_k^{nvent} \dot{m}_{v,k,i} (\omega_{v,k,i} - \omega_{req,i}) + W_{g,i} + \sum_{i-j}^{surfaces} m_{cp\ lg,s} (\omega_{j,\tau-\Delta t} - \omega_{i,\tau-\Delta t}) - \frac{M_{eff,i} (\omega_{req,i} - \omega_{i,\tau-\Delta t})}{\Delta t} \right)$$

$Q_{lat,i}$: énergie latente retirée (positive pour la déshumidification, négative pour l'humidification)

h_v : chaleur de vaporisation de l'eau

$\omega_{req,i}$: point de consigne pour l'humidification ou la déshumidification

Tout en considérant un flottement libre de HR entre deux points.

Modèle 2 d'humidité : utilisant un tampon de stockage (buffer)

Un tampon hygroscopique fictif est supposé représenter l'absorption et la diffusion de la vapeur d'eau par l'ensemble des matériaux solides présents dans la zone. Le stockage d'humidité est prononcé à la surface et dans le cœur du tampon, en considérant que :

- les murs, le sol et le plafond font le tampon de la zone ;
- Au fil du temps, de l'humidité peut entrer dans et sortir du tampon
- Le tampon est divisé en surface et profondeur "surface", "deep storage"
- Chaque tampon est défini par trois paramètres :

1- K : pente d'isothermes sorption (capacité du hydrique matériau) ;

2- M : masse du matériau ;

3- β : coefficient d'échange (contrôle du transport HR à partir du stockage aux nœuds zone).

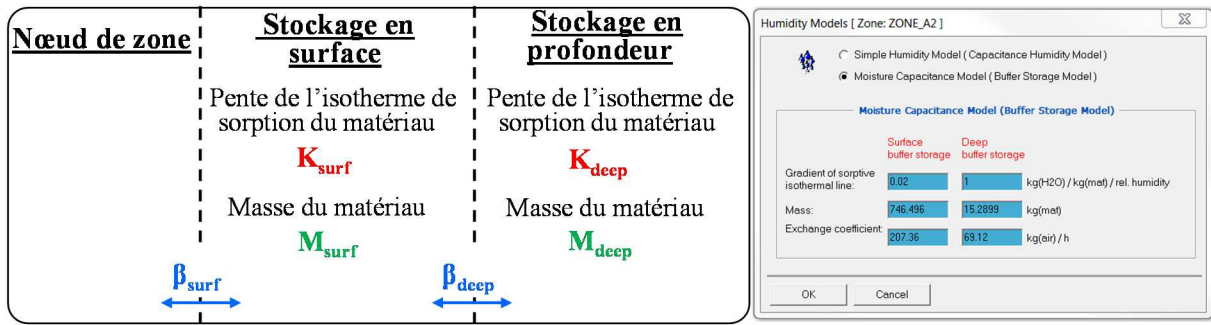
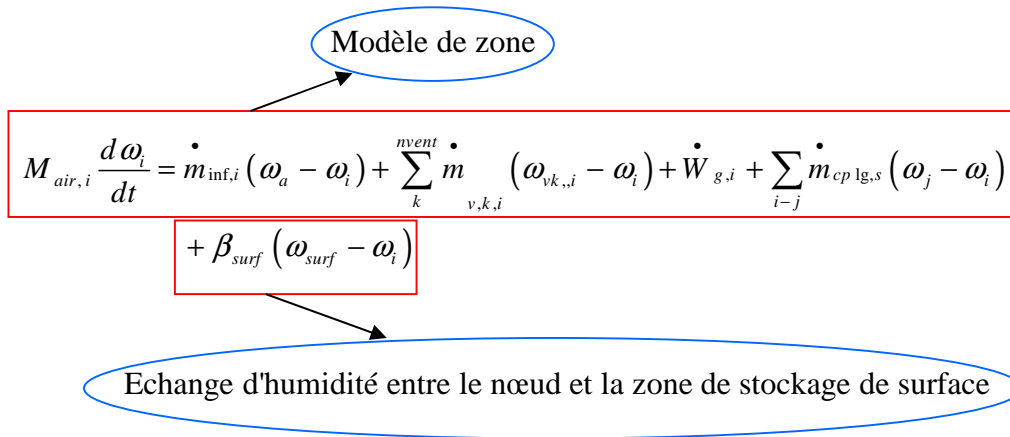


Figure A-4-1 : Modèle de tampon hygroscopique, exemple d'application «maison en pierre»



ω_i : taux d'humidité de la zone i ;

ω_a : taux d'humidité ambiante ;

$\omega_{v,k,i}$: taux d'humidité de l'air de ventilation de type ventilation k ;

ω_j : taux d'humidité d'une zone adjacente j

ω_{surf} : taux d'humidité de la surface de stockage.

Deux équations introduites pour décrire la dynamique du contenu de l'eau de la surface et le stockage profond.

$$M_{surf} k_{surf} f(\varphi, \omega) \frac{d\omega_{surf}}{dt} = \beta_{surf} (\omega_i - \omega_{surf}) + \beta_{deep} (\omega_{deep} - \omega_{surf})$$

$$M_{deep} k_{deep} f(\varphi, \omega) \frac{d\omega_{deep}}{dt} = \beta_{deep} (\omega_{surf} - \omega_{deep})$$

ω_{deep} : taux d'humidité du stockage profond

k_{surf} : pente de l'isotherme de sorption du tampon de surface [kg_{water} / kg_{material} / HR]

k_{deep} : gradient de la ligne d'isotherme de sorption du tampon de profondeur

$f(\varphi, \omega)$: facteur de conversion à partir de l'humidité relative de la proportion d'humidité

β_{surf} : coefficient d'échange entre le stockage et la zone de surface

β_{deep} : coefficient d'échange de surface entre le stockage et le stockage en profondeur

Il est noté qu'il faut attribuer les couches réelles de la paroi aux deux types de stockage de l'humidité. Pour le tampon de surface, il est applicable seulement avec le matériau de la plus faible résistance à la diffusion, au moyen de l'équation :

$$\beta_{surf} = \frac{0.1A}{\frac{0.094}{\beta'} + \sum_i d_i \mu_i}$$

β_{surf} dépend de la taille de la surface A (m²), le coefficient de vapeur de transition β' (≈ 12 m/h), l'épaisseur d en m et la résistance à la diffusion μ de la couche i .

Pour le calcul de β_{deep} , le coefficient de transition de vapeur peut être négligé.

$$\beta_{deep} = \frac{0.1A}{\sum_i d_i \mu_i}$$

Si l'épaisseur d est choisie, la masse correspond à :

$$M = 2dA\rho$$

L'humidité de stockage de surface de la paroi est bien décrite, mais la capacité des parties les plus profondes est négligée.

L'influence des murs peut être bien décrite si :

$$\frac{\beta_{surf}}{A} = 3 \left[kg_{air} / m^2 h \right]$$

$$\frac{\beta_{deep}}{A} = 1 \left[kg_{air} / m^2 h \right]$$

Le calcul de ces coefficients est effectué une seule fois au début de la simulation. La teneur en eau variable dans le matériau, ne peut être prise en compte dans le calcul du transfert de chaleur.

Le modèle permet de prendre en compte le transfert d'humidité entre une paroi externe (avec $d_{surf} = d_{EMPD}$) une paroi interne ou meubles ($d_{surf} = 2 \times d_{EMPD}$) et la zone d'air seulement.

Annexe B : Propriétés de transfert de masse

1. Evolution des teneurs en eau

1-1. Teneur en eau du béton de bois

Les teneurs en eau d'équilibre obtenues des trois catégories d'échantillons du béton de bois sont sensiblement les mêmes. Les courbes sont relativement homogènes en adsorption et en désorption pour les trois dimensions d'échantillons (petits, moyens et gros).

Il a été remarqué que la taille et l'épaisseur de l'échantillon ont un effet sur la vitesse de reprise en eau, même si la température est faible et stable (20°C). La stabilisation du palier a pris plus de temps pour les gros échantillons que pour les petits. Elle s'est faite graduellement selon l'épaisseur, commençant par les échantillons moyens qui étaient les moins épais, puis les petits, et enfin les gros. Notant que la sorption pouvant beaucoup dépendre de la température dont c'est important de se placer à une température constante, d'où l'appellation « d'isotherme de sorption ». La Figure B-1 montre un zoom sur l'un des paliers de sorption.

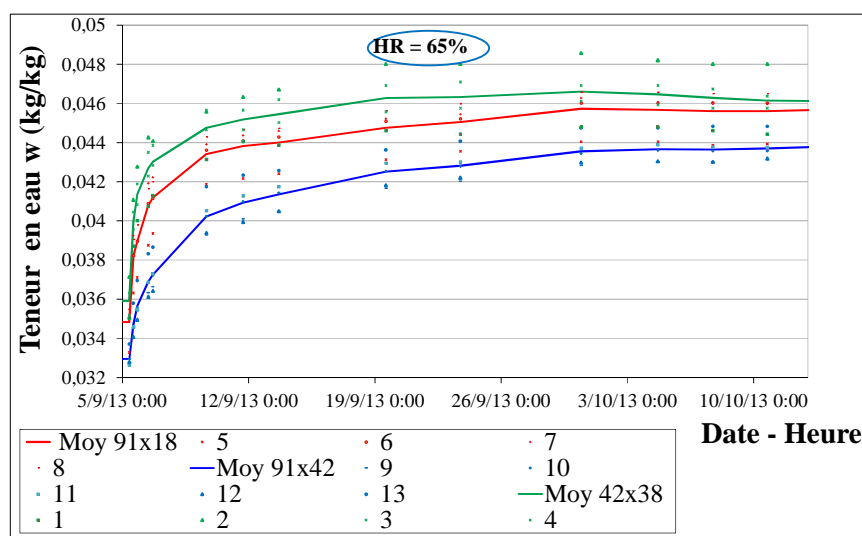


Figure B-1 : Zoom sur un palier d'adsorption du béton de bois (65%)

2.2. Teneur en eau des briques de terre

Comme pour le béton de bois, les teneurs en eau d'équilibre des trois échantillons de la brique de terre sont visiblement les mêmes. Les courbes sont bien homogènes en adsorption et en désorption pour les trois demi-briques testées (Figure B-2).

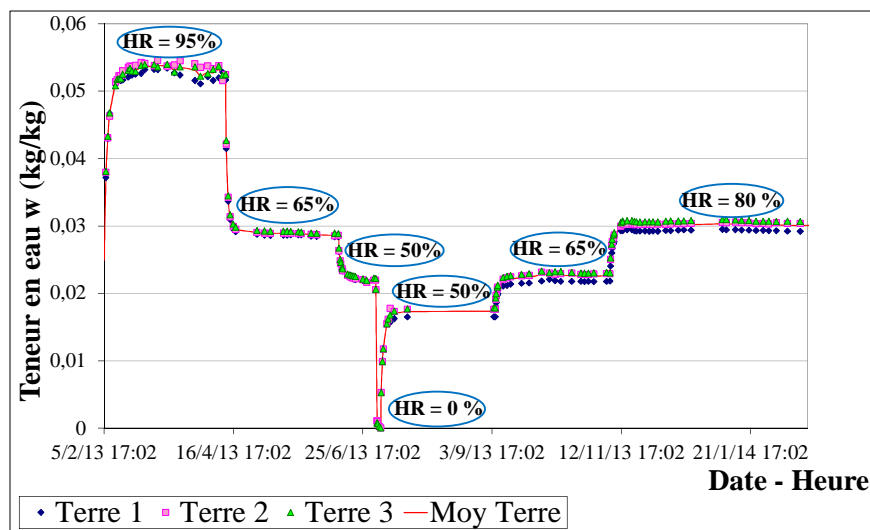


Figure B-2 : Teneur en eau des briques de terre

1-3. Teneur en eau de la pierre travertin

Le travertin est une pierre à double porosité, ouverte et fermée. Les teneurs en eau d'équilibre des deux échantillons testés de cette pierre sont aussi identiques. Les courbes sont bien homogènes en adsorption et en désorption (Figure B-3). Néanmoins, la stabilisation du premier palier d'adsorption à 95 %HR était un peu perturbée, comparée à celle des autres matériaux. Cette perturbation peut être attribuée à la rugosité des échantillons testés.

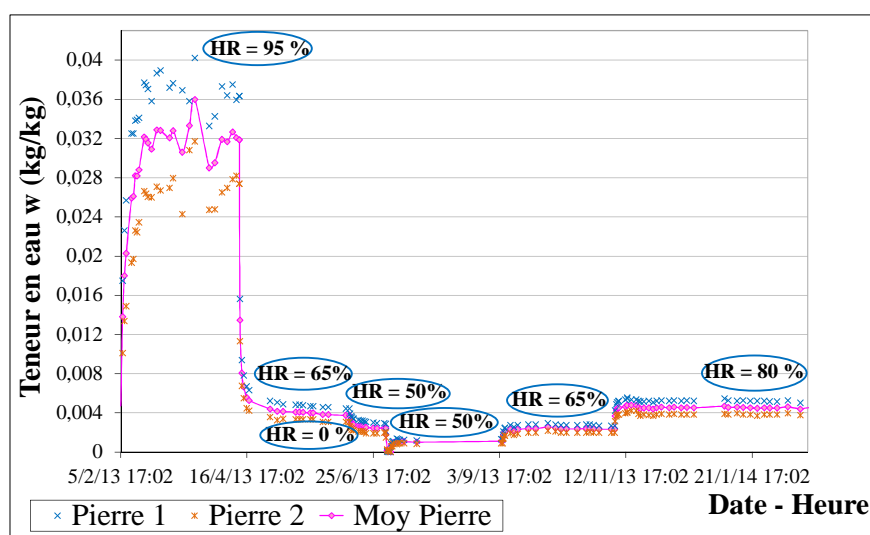


Figure B-3 : Teneur en eau de la pierre « Travertin »

2. Isothermes de sorption

2-1. Isothermes de sorption du béton de bois

L'isotherme obtenue pour le béton de bois présente un cycle d'hystérésis assez ouvert causé par l'effet de l'histoire hydrique sur les relations eau/matériau dans le domaine hygroscopique (conformation des clusters des molécules d'eau condensées dans les microporosités du matériau) (Figure B-4). Sa forme est du type général d'une isotherme sigmoïde présentant les trois zones suivant le mode de fixation de l'eau. La première pour les activités en eau faibles, correspond à l'eau liée sous forme de monocouche moléculaire à la surface du matériau ; La deuxième pour les activités en eau moyennes, correspond à l'adsorption des molécules sur la monocouche précédente ; La troisième pour les activités en eau importantes, correspond à l'eau libre dans les pores.

Une bonne concordance est marquée entre les courbes théoriques (adsorption, désorption) issues du modèle thermodynamique de Merakeb (2006) et celles obtenues de l'expérimental. Avisant que la température au sein de l'enceinte climatique était bien stable durant l'expérimentation, qui est un facteur nécessaire pour avoir des cinétiques de sorptions fiables. Mais qu'au fur et à mesure que l'humidité relative augmente, le temps de stabilisation devient plus élevé pour tous les matériaux testés. Ceci peut être expliqué par les phénomènes non Fickiens [Perré et al, 2007] qui sont dus au comportement des macromolécules des parois du matériau. Pour de fortes teneurs en eau, une réorganisation moléculaire est nécessaire pour libérer les sites de sorption.

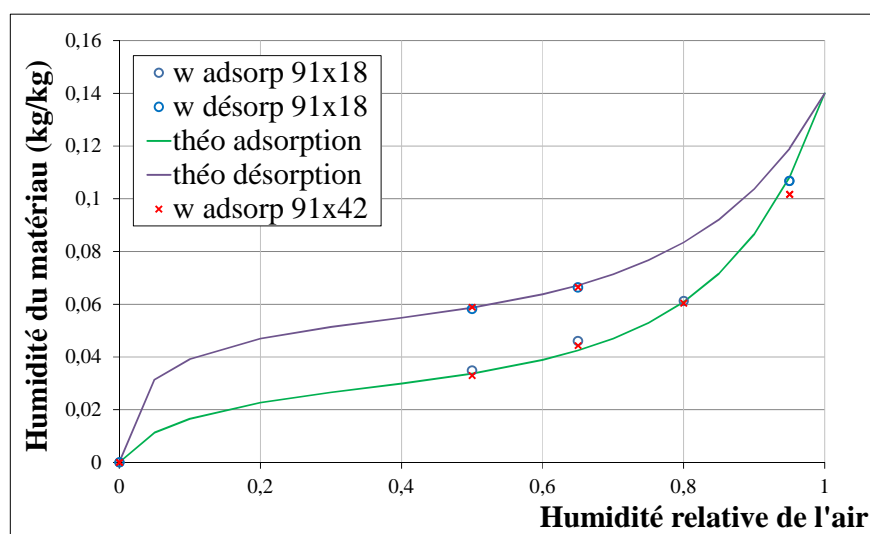


Figure B-4 : Isotherme de sorption du béton de bois

2-1. Isothermes de sorption du béton de la brique de terre

L'isotherme de forme sigmoïdale obtenue le cas de la brique de terre présente un cycle d'hystérésis peu marqué et peu ouvert, à cause de la faible hygroscopicité du matériau terre comparée à celle du béton de bois. Les isothermes théoriques collent bien avec les isothermes expérimentales, suite à l'identification des paramètres du modèle utilisé (Figure B-5).

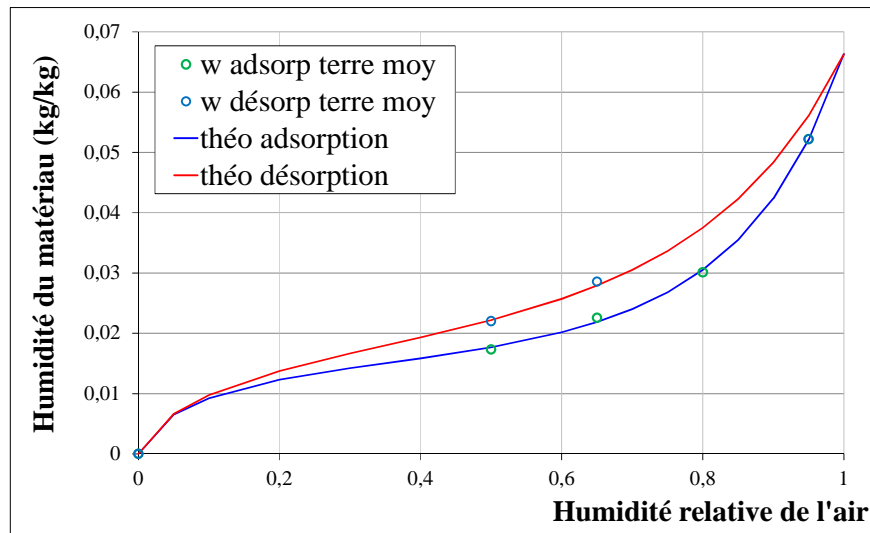


Figure B-5 : Isotherme de sorption de la brique de terre

2-3. Isotherme de sorption du travertin

La zone étroite entre la courbe de sorption et celle de désorption au cas du travertin, quelle que soit la situation initiale en humidité, indique une hystérésis négligeable comparée à celle des autres matériaux (Figure B-6). Ce résultat est affirmé par les travaux de Künzel sur les pierres naturelles [Künzel, 1995], [Künzel, Kiessel, 1997]. Les isothermes théoriques collent aussi bien avec les isothermes expérimentales.

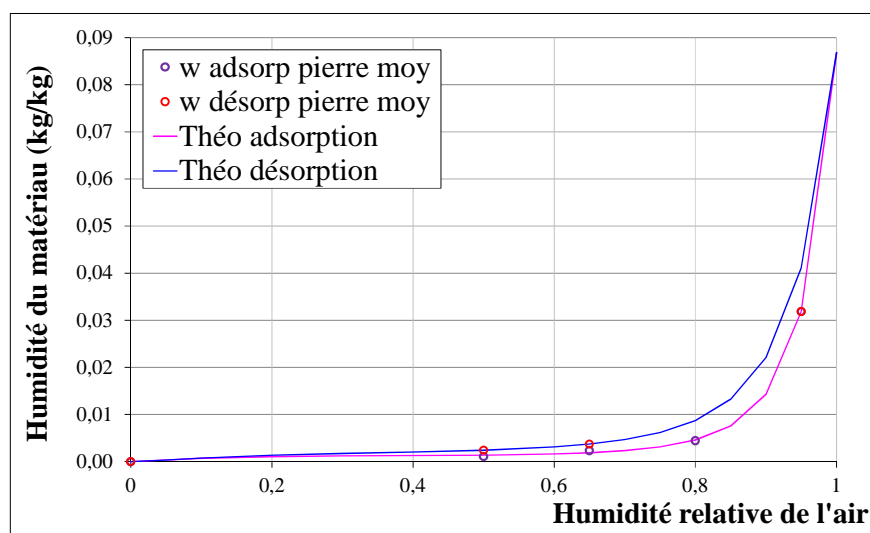


Figure B-6 : Isotherme de sorption de la pierre « travertin »

Cependant, les courbes de désorption et d'adsorption pour les matériaux testés et en général pour tous les matériaux de construction ne sont pas les mêmes, car le séchage du matériau entraîne des modifications de structure et de porosité irréversible [Jannot, 2008]. Lors du séchage on distingue trois phases représentant des variations de vitesse : la première, l'évaporation en surface, la deuxième, la diffusion à partir d'un front d'humidité se déplaçant vers le plan médian et la troisième, la mise en équilibre hygroscopique [CSTB, 2009]. Quant à l'augmentation de la masse apparente des échantillons suite à l'élévation de l'humidité relative de l'air à la surface du matériau est due au phénomène de « l'adsorption physique ». Ce phénomène permet de fixer les molécules d'eau à la surface des pores d'une façon réversible. A l'échelle microscopique, il s'agit de l'adsorption monomoléculaire, l'adsorption polymoléculaire et la condensation capillaire [Collet, 2004].

En comparant les hystérésis des matériaux étudiés, on remarque que la boucle d'hystérèse est plus grande dans le cas du béton de bois. Ceci est peut être lié à la présence de microporosité dans la matrice cimentaire qui a une grande affinité pour l'eau, qui retient une quantité plus élevée de molécules pendant la phase de désorption. Les copeaux de bois retiennent aussi l'eau, il s'agit d'un matériau anisotrope.

Également, l'expérimentation sur différentes formes et dimensions de matériau dévoile que la taille de l'échantillon reste de moindre effet en général sur la détermination des isothermes et sur la forme des isothermes. Cette constatation est en accord avec les résultats des travaux du projet HYGRO-BAT [Woloszyn et al, 2014]. La forme de l'isotherme est surtout dépendante

de la nature du matériau et de son degré d'hygroscopicité. Ce qui peut être noté est que l'hystérésis semble aussi dépendante des humidités relatives initiale et finale. Evrard, (2008) trouve qu'en plus de ces dépendances, l'hystérésis dépend pareillement de la géométrie des échantillons. Selon Samri (2008), la forme des courbes est liée à la géométrie et à la distribution des pores du matériau.

3. Isothermes partielles des matériaux

D'après Merakeb (2006), les équations ci-dessous donnent une méthode de construction d'isothermes partielles, en faisant intervenir un terme additionnel (de raccord entre isothermes d'adsorption/désorption), en fonction de $\Delta\phi$ et α . Ces équations permettent de connaître la courbe d'évolution d'une adsorption (indice a) ou d'une désorption (indice d), à partir d'un point de départ quelconque (h_0, w_0), situé nécessairement à l'intérieur de l'aire d'hystérésis, ou sur l'une des isothermes enveloppes. L'expression de $\Delta\phi$ est la même en adsorption et en désorption. L'expression de α est par contre différente suivant le sens de l'évolution (a = adsorption ou d = désorption). En revanche cette construction est purement géométrique, et n'est basée sur aucun fondement physique. Toutefois, des essais d'isothermes partielles du matériau bois ont présenté une assez bonne correspondance avec celles du modèle [Merakeb, 2006]. Les Figures B-7, B-8 et B-9 illustrent les isothermes partielles construites avec ce modèle aux cas du béton de bois, la brique de terre et le travertin.

$$\ln \frac{w}{w_s} = \phi \cdot \ln \exp(a \cdot h) + \Delta\phi \cdot \ln h \cdot \exp(\alpha \cdot h) \quad (\text{B-1})$$

$$\Delta\phi_a = \frac{\ln \frac{w_0}{w_s} \phi_a \cdot \ln \exp(a \cdot h_0)}{\ln h_0 \cdot \exp(\alpha_a \cdot h_0)}$$

* **Adsorption :**

$$h_0 \cdot \alpha_s = \ln \frac{\ln \frac{w_0}{w_s}}{\phi_s \ln h_0} \quad (\text{B-2})$$

* **Désorption**

$$h_0 \cdot \alpha_d = \ln \frac{\ln \frac{w_{0d} - w_{0a}}{w_s}}{\phi_d \ln h_0} \quad (\text{B-3})$$

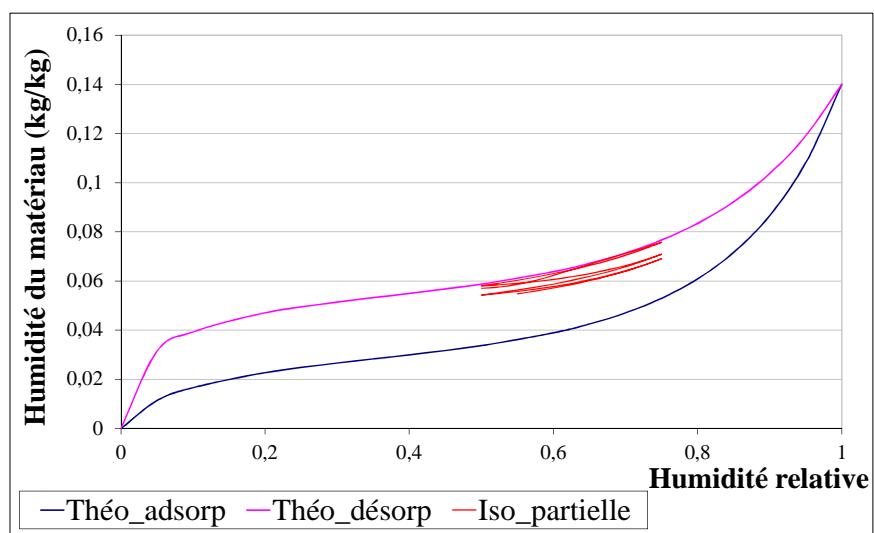


Figure B-7 : Cycles partiels partant de la courbe enveloppe de désorption et d'amplitude 25%HR, cas du béton de bois

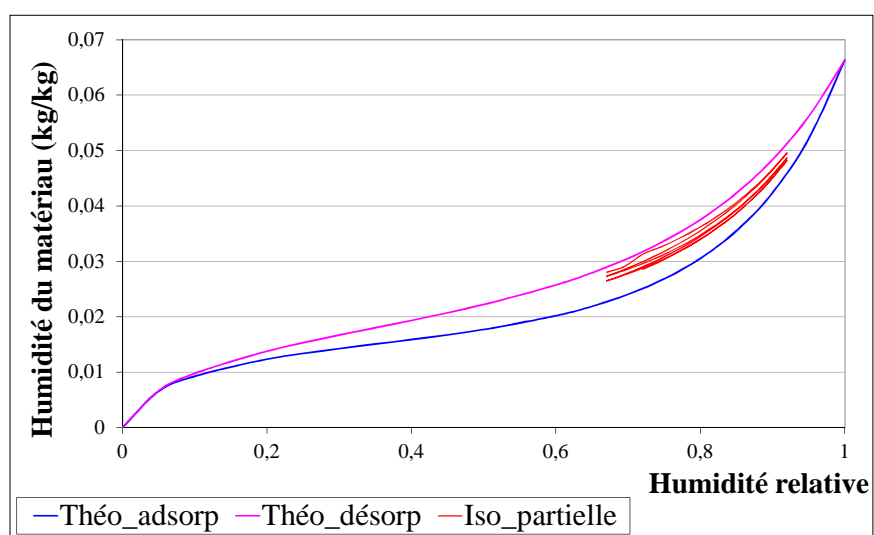


Figure B-8 : Cycles partiels partant de la courbe enveloppe de sorption et d'amplitude 25%HR, cas de brique de terre

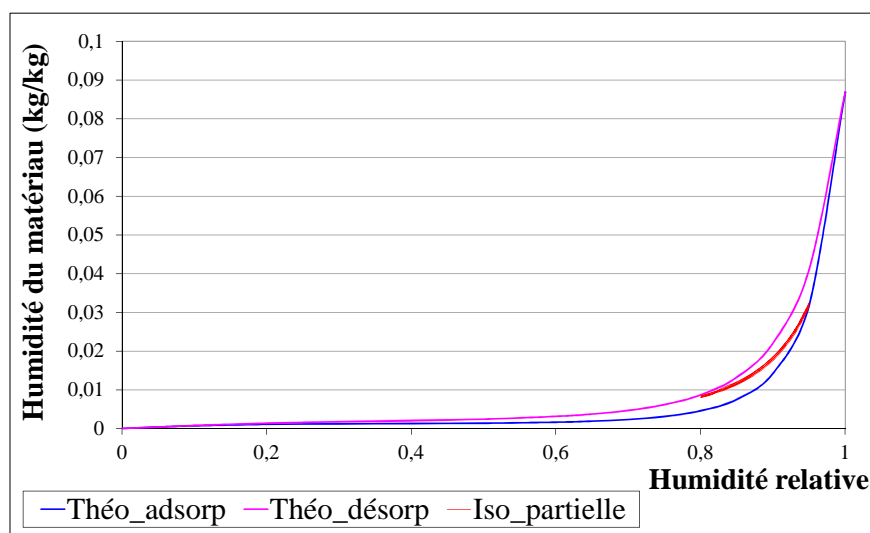


Figure B-9 : Cycles partiels partant de la courbe enveloppe de désorption et d'amplitude 15%HR, cas de la pierre travertin

4. MBV (Moisture Buffer Value)

Pour le cas des briques de terre crue, la MBV moyenne calculée sur les trois derniers cycles est de 03 g/m².%HR (voir tableau B-1, Figure B-10), considérée aussi comme excellent régulateur hydrique. Une récente étude montre que la MBV mesurée sur autant d'échantillons de maçonnerie d'argile varie entre 1,13 et 3,73 g/m².% HR [McGregor et al, 2014]. Evrard (2008) pour ses briques d'argile a trouvé une valeur de 0,96 à 1,01 g/m².%HR. Ceci signifie que le pouvoir tampon hydrique est dépendant de la nature granulométrique du matériau terre testé. McGregor et al, (2014) affirment que la sélection de la terre (la minéralogie et la distribution de la taille des particules) est plus importante pour le tampon d'humidité que les changements qui peuvent être apportés à une terre particulière (densité, méthodes de préparation ou de stabilisation).

Tableau B-1 : MBV moyenne sur 03 derniers cycles des échantillons de brique de terre

| Echantillon | Terre ₁ | Terre ₂ | Terre ₃ | Moyenne | Ecart type |
|-------------|--------------------|--------------------|--------------------|---------|------------|
| MBV_{moy} | 3,08 | 2,95 | 2,99 | 3,00 | 0,05 |

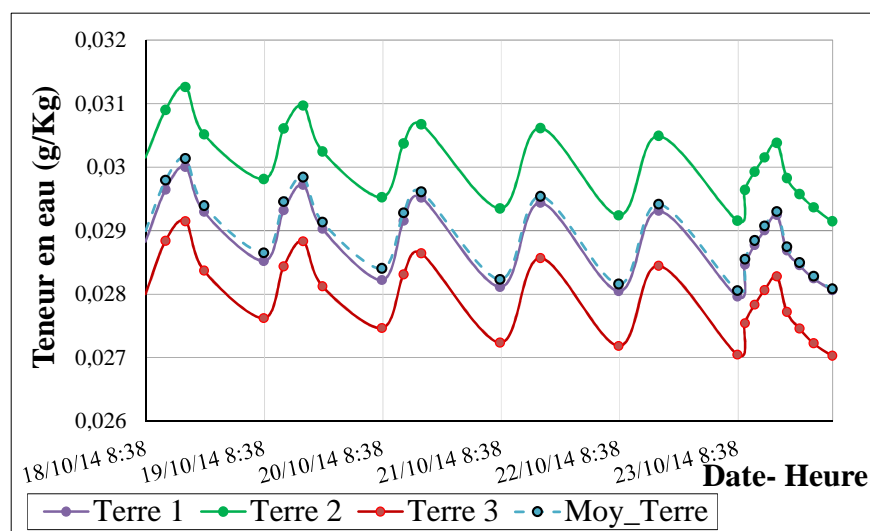


Figure B-10 : Cycles MBV des échantillons de brique de terre

Une MBV moyenne de 0,56 g/m².%HR est trouvée au cas du travertin (tableau B-2, Figure B-11), ce qui la catégorise comme matériau à régulation hydrique limitée à modérée. A noter que l'analyse chimique du travertin au laboratoire révèle qu'il contient 86,99 % de CaCO_3 , 11,1% d'insolubles et des traces de gypses [Medjelekh, 2006].

Tableau B-2 : MBV moyenne sur 03 derniers cycles des échantillons de la pierre

| Echantillon | Pierre ₁ | Pierre ₂ | Moyenne | Ecart type |
|-------------|---------------------|---------------------|---------|------------|
| MBV_{moy} | 0,63 | 0,50 | 0,56 | 0,06 |

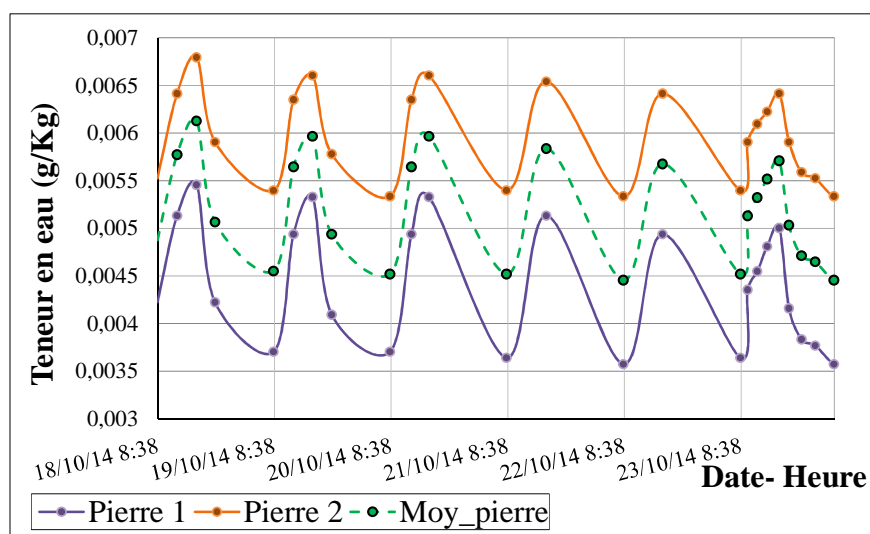


Figure B-11: Cycles MBV des échantillons de pierre

La plaque de plâtre, ses échantillons étaient problématiques à cause de leur faible épaisseur (12,5 mm). Bien que la même épaisseur du matériau a déjà été testée dans le projet Nordtest. Nos essais donnent deux valeurs, une MBV de 0,78 g/m².%HR au cas de l'échantillon étanchéifié du côté du plâtre et une MBV de 1,33 g/m².%HR au cas des échantillons étanchéifiés du côté du carton (Figure B-12). La première valeur, considérée juste, la classe comme matériau à régulation hydrique modérée. Elle est proche des résultats indiqués dans le projet Nordtest sur la plaque de gypse (0,63 g/m².%HR). En revanche, les échantillons testés dans ce projet avaient une seule face exposée, ce qui réduit la vitesse de diffusion hydrique.

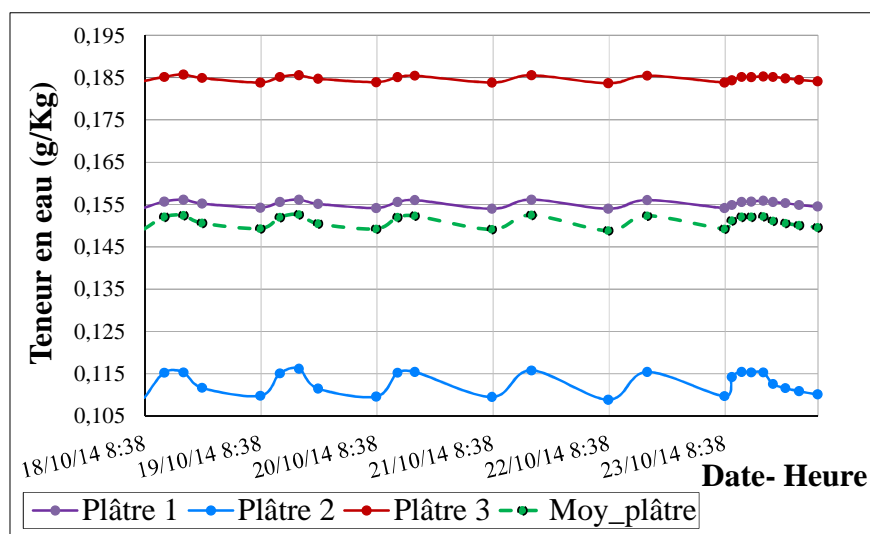


Figure B-12 : Cycles MBV des échantillons de la plaque de plâtre

Annexe C : Caractérisation de la cellule-test en rondins

1. Protocol expérimental

1-1. Présentation de la cellule-test en rondins

La fuste est un bâtiment de petite taille, de volume intérieur 20 m³ dont l'enveloppe a été réalisée en parois de rondins (bois empilés) écorcés de douglas à l'échelle 1. Le diamètre moyen des rondins 40 cm. La cellule-test a pour seule ouverture une porte d'entrée isolante (Figure C-1). Une toiture végétalisée débord de 50 cm sur les rondins permettant de limiter les apports solaires d'été, en orientation sud. Les flux parasites, échanges par la toiture ou le plancher, ont été minimisés en renforçant l'isolation de ces éléments par la laine de mouton.



Figure C-1 : Vues de face de la cellule-test en rondin

1-2. Instrumentation

1-2-1. Installation des capteurs et suivi des relevés

La figure C-2 ci-après montre l'appareillage de mesure de la fuste. En plus des capteurs utilisés au niveau de la cellule-test béton de bois, prévus pour la mesure de température hygrométrie de l'air, les grandeurs énumérées ci-dessous ont été mesurées au niveau de la fuste. Les acquisitions ont été espacées de 15 minutes :

- Températures de surface intérieure et extérieure des rondins (plan médian du rondin et au voisinage immédiat de la gorge) en diverses orientations (sonde à film ZTA685AK, Ahlborn);
- Température de la gorge au cœur de la laine de mouton (sonde PT100) ;
- Teneur en eau du bois près des surfaces intérieure et extérieure, estimée à partir d'une mesure de la conductivité électrique du matériau (FHA636MF, Ahlborn);

Le tableau C-1 ci-dessous résume les caractéristiques de tous les capteurs utilisés.

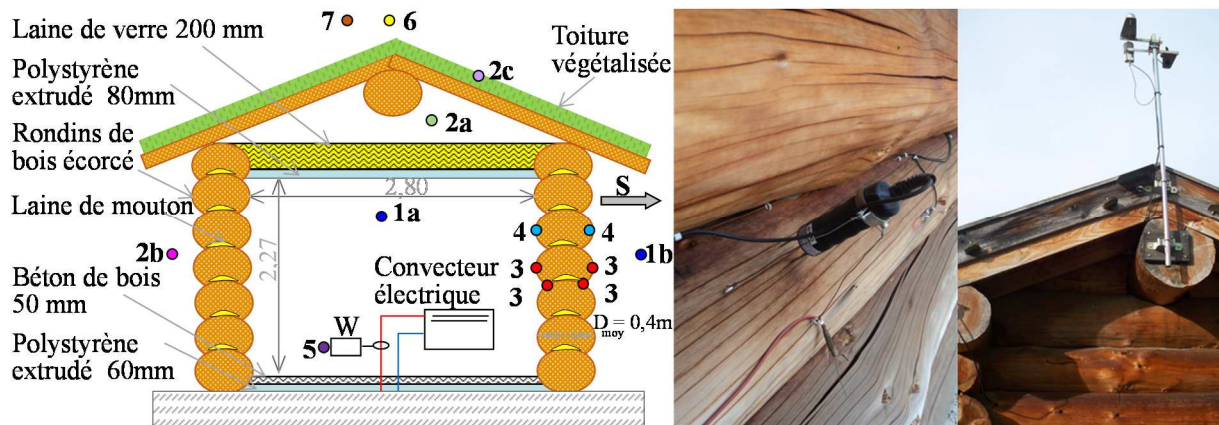


Figure C-2 : Appareillage de la cellule-test en rondins, capteurs de contact et station météo

Une caméra infrarouge FLIR SC-7600 a également été utilisée pour détecter les défauts d'isolation à débusquer et mesurer la température surfacique des murs de la cellule-test. La caméra est d'une résolution de 640*512 pixels, arbore une large bande de 1,5 à 5,1 μm . Elle est sensible à 15 μm de longueur d'onde et 20 mK (0,02 $^{\circ}\text{C}$) de température. La fréquence d'acquisition de l'appareil est d'une minute, dont la précision de mesure est estimée à $\pm 1^{\circ}\text{C}$ dans la plage 5 à 100 $^{\circ}\text{C}$ et $\pm \%$ plus de 100 $^{\circ}\text{C}$. Le matériel n'étant pas protégé contre le rayonnement solaire, les mesures ont été effectuées sur des durées limitées (fin d'automne, en fin de journée) à condition de différence de température de plus de 10 $^{\circ}\text{C}$ entre la cellule-test chauffée et l'extérieur.



Figure C-3 : Caméra infrarouge FLIR 7600 utilisée (Source : www.flir.com)

Tableau C-1 : Caractéristiques des capteurs de mesure utilisés dans la fuste

| <i>Repère</i> | <i>Type</i> | <i>Référence</i> | <i>Marque</i> | <i>Plage</i> | <i>Précision</i> |
|--|---|-----------------------------|--------------------------|--------------------------------------|--|
| ● <i>1a-1b</i> | Thermo-hygromètre | FHA646E1 | Wimesure (ex-Ahlborn) | 0 – 100% | ± 2% de HR dans la plage < 90% HR à T nominale |
| | | | | -20 à+ 80°C | -20 à 0°C : ±0.4 °C 0 à 70°C : ±0.1°C 70 à 80°C: ±0.6 °C |
| ● <i>2a</i> | Sonde PT100 l=100mm câble 1.5m | FPA10L0100 | | -200°C à +600°C | ± 0.3K |
| ● <i>2b</i> | Sonde PT100 l=100mm + option câble téflon/silicone 5m | FPA10L0100 OPK01L0050 | | -200°C à +600°C -50 à+ 200°C | ± 0.3K - |
| ● <i>2c</i> | Sonde PT100 l=250 mm | FPA10L0250 | | -200°C à +600°C | ± 0.3K |
| ● <i>2d</i> | Sonde PT100 | FPA611 | | -10 à+ 90°C | ± 0.3K |
| ● <i>3</i> | Capteur PT100 à film+ Câble de liaison 2m | FP96852 ZTA685AK | | -80°C à+180°C -20°C à+80°C | ± 0.3K - |
| ● <i>4</i> | Sonde d'humidité des matériaux par mesure de conductance | FHA636MF | | 7 à 30%HR Référence à la masse | ±1% de répétabilité à 23°C±2°C de température nominale |
| ● <i>5</i> | Compteur d'impulsion | TYWatt 40 + ZA9909AK2U | Delta-Dore + Wimesure | 0 à 65 000 imp | 1 imp |
| ● <i>6</i> | Sonde de rayonnement global | FLA613GS | Wimesure (ex-Ahlborn) | 400 à 1100 nm -20 à+ 60°C | <10% à température nominale -20°C ±2°C |
| ● <i>7</i> | Anémomètre à coupelles, câble 12m | FVA6152 | | 0,5 à 50 m/s | ± 0.5 m/s |
| Modules d'acquisition de données aveugles (9 entrées mesure) | | MA85909 ALMEMO 8590-9 | | - | - |
| Option S : Mémoire EEPROM 512 KB, 100000 points de mesure | | OA8590S | | - | - |
| Câble interface USB/Almemo l=1.5m | | ZA1919DKU | | - | - |

2. Température de l'air et de surface

La température ambiante dans la fuste se trouve dans les limites du confort thermique, selon de la norme Européenne NE15251 [BSI, 2008] (Figure C-4). L'effet de l'inertie thermique est

bien apparent avec des amortissements modérément bons jusqu'à 7,8°C max, mais des déphasages courts (1h15 à 3h15, Figure C-5). Les températures surfaciques internes, en creux et bosse (TSIntCreux, TSIntBosse) du rondin sont étroitement proches de la température interne. Tandis que les surfaciques externes (TSExtCreux, TSExtBosse) notent des écarts de la température externe jusqu'à 5°C. A cause de sa porosité, le bois possède une très faible capacité de transférer la chaleur. Ainsi la surface des rondins maintient un équilibre relativement stable avec la température de l'ambiance.

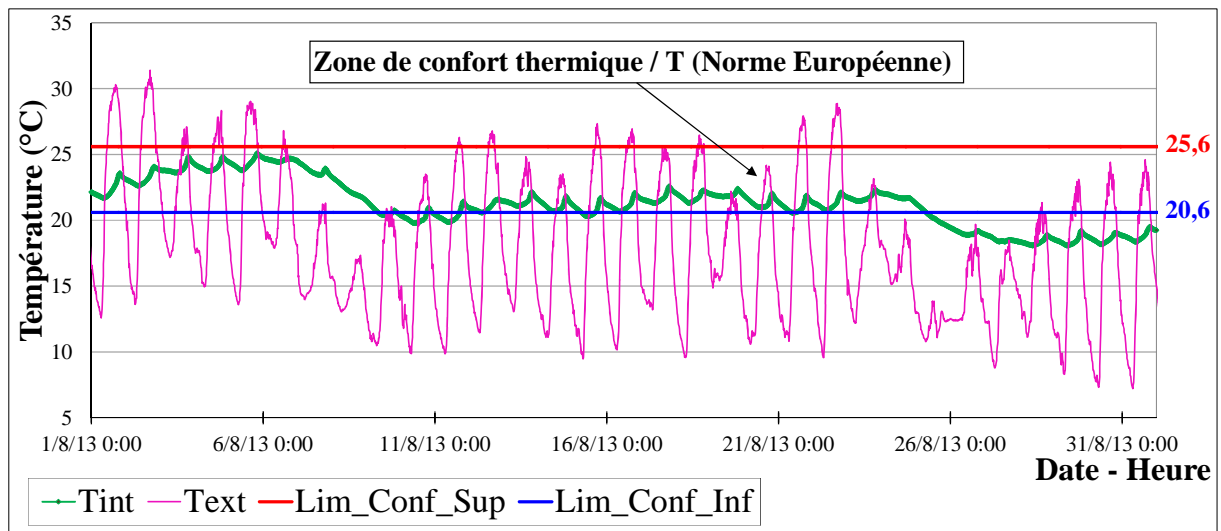


Figure C-4 : Températures et limites du confort thermique / T « fuste, mois d'août »

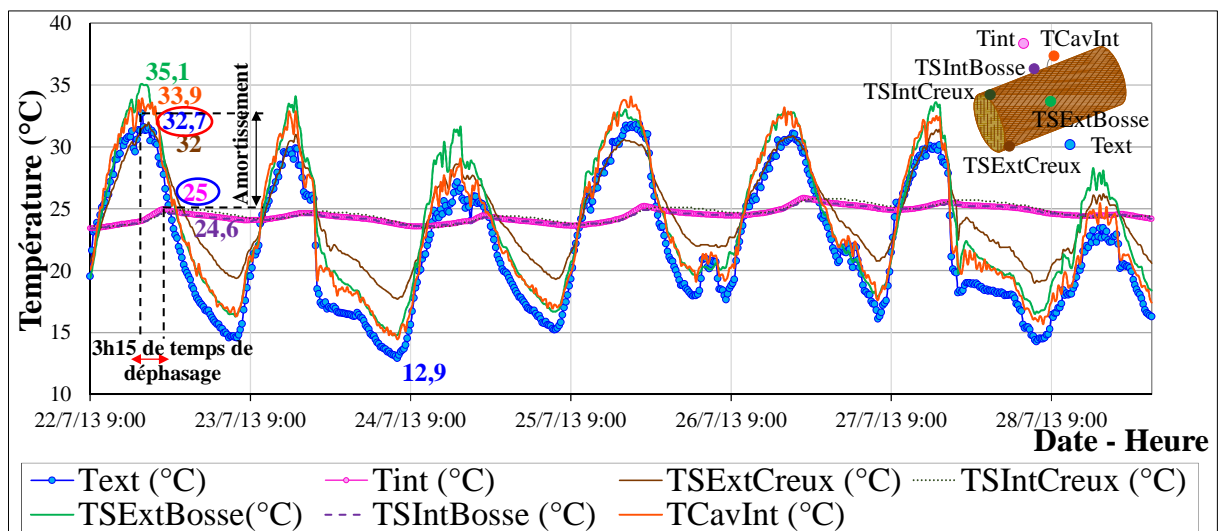


Figure C-5 : Variation de la température de l'air et surfacique « fuste, semaine d'été »

Par ailleurs, une forte amplitude a été prélevée au niveau d'une cavité du rondin (TCavInt), reprenant la variation de l'amplitude thermique externe. Ce comportement pourra être cédé aux flux parasites, autres qu'à travers cette cavité créée dans la paroi du rondin.

Pareillement la variation de la température dans une fissure sud (TFissExtSu) suit celle d'extérieur en orientation sud (Figure C-6). Sans stratification, la température en partie haute de la fuste demeure stable, mais pas au niveau du comble. Malgré la protection de la toiture végétalisée, sa température est plus élevée. La laine de verre et le polystyrène extrudé au niveau du plafond causent des maximales tendant plus vers la température externe. Or la température de la gorge, prise au cœur de l'isolant (T Laine) enregistre des valeurs autour des températures ambiantes. Alors en été, la fuste sous plafond offre une bonne homogénéité de la température intérieure et permet une isolation thermique, renforcée par la laine de mouton.

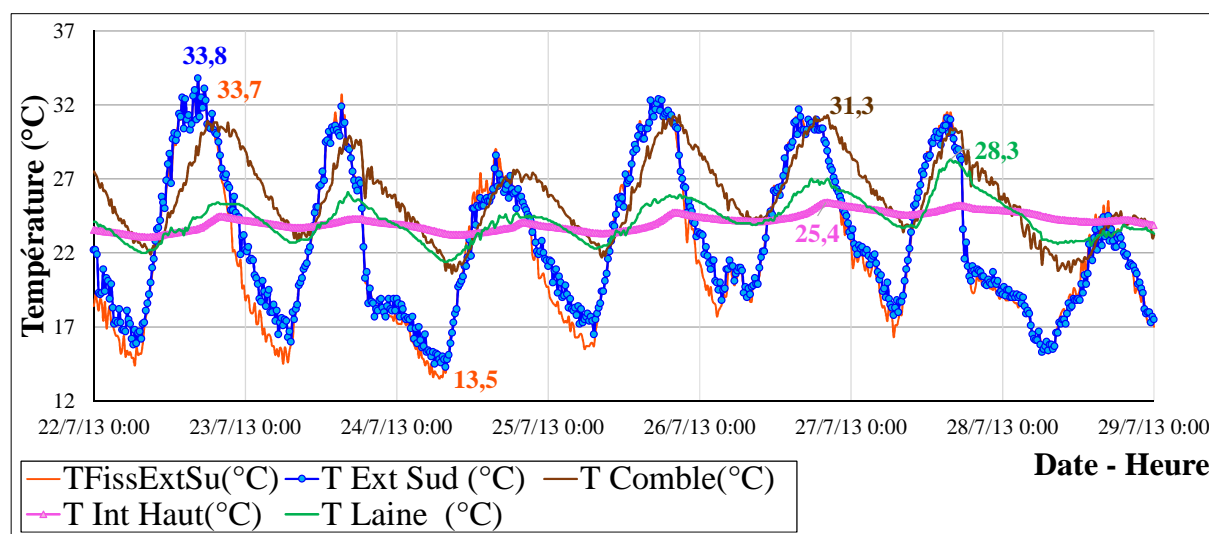


Figure C-6 : Variation de la température intérieure, extérieure « la fuste, semaine d'été »

En hiver et en absence du chauffage, la fuste assure également des températures très stables, toutefois très faibles (Figure C-7). Si le bois a une faible conductivité thermique qui empêche la chaleur de pénétrer dans la structure en été, il s'agit d'un facteur limitatif pour des fins de stockage thermique en hiver. Des températures surfaciques externes jusqu'à 46,6 et 44,7 °C ont été notées respectivement en bosse et en creux du rondin. Ces extrêmes sont dus à la charge thermique maximale en journées ensoleillées produite après 13h, en raison de l'évolution météorologique quotidienne. Or les températures surfaciques internes, en creux et bosse se rapprochent de la température ambiante, excepté en jours ensoleillés où celle du creux s'éloigne légèrement. En cavité, la température reprend aussi la variation de celle externe. En revanche en présence du chauffage, une puissance moyenne de 391,21W a été utilisée pour assurer une température ambiante moyenne 21,5°C (Figure C-8). Une bonne cohérence a été trouvée entre le bilan énergétique global de la fuste et les consommations théoriques estimées sous l'hypothèse d'une succession de régimes permanents (calcul mené par éléments finis donnant pour le mur un coefficient : $U=0.47 \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$) [Ulmet et al, 2009].

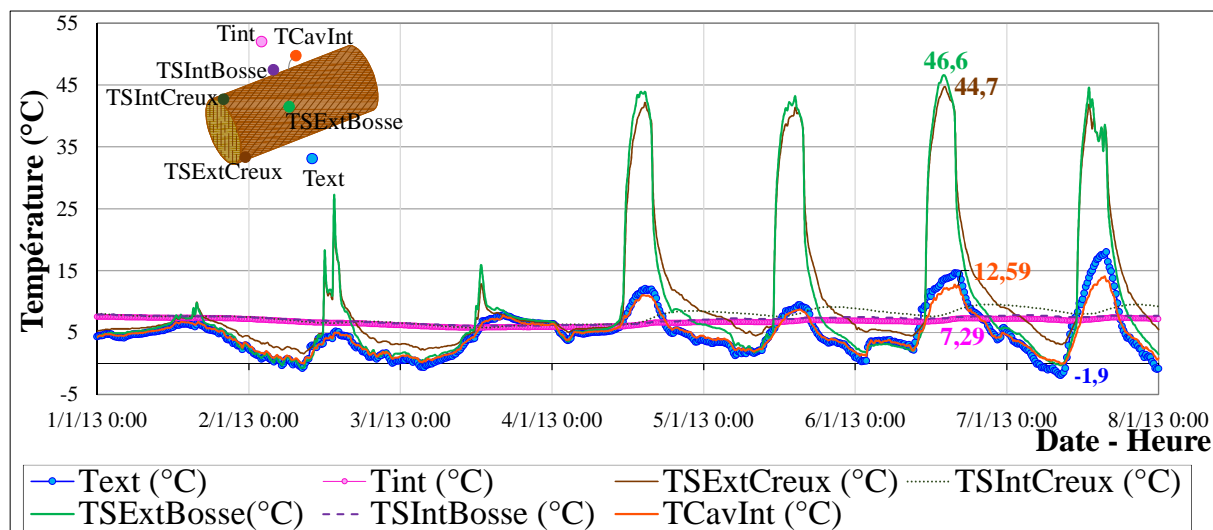


Figure C-7 : Variation de température de l'air, surfacique et en cavité: fuste, semaine d'hiver

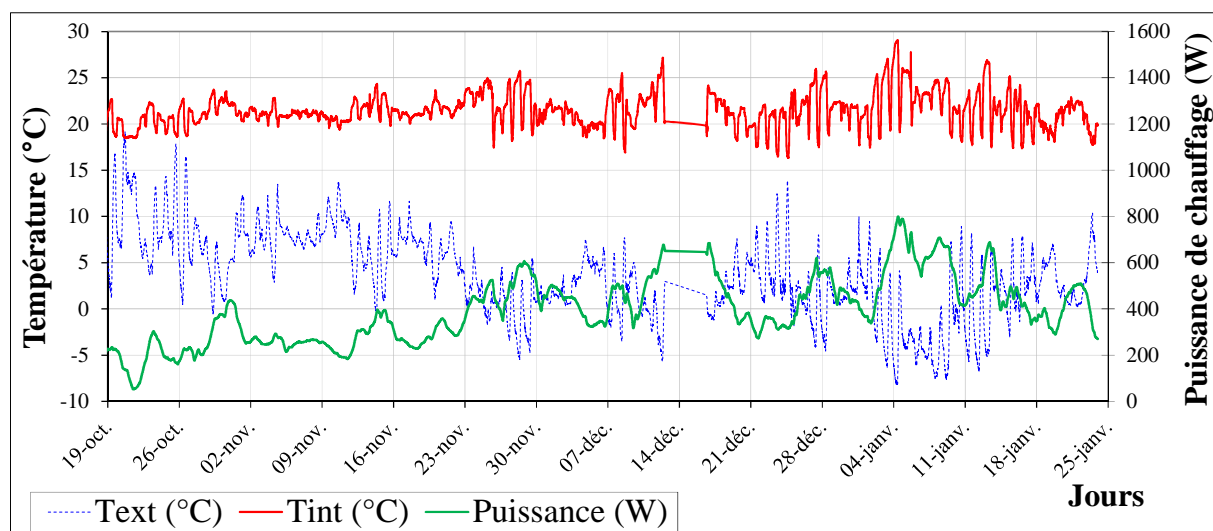


Figure C-8 : Variation des températures et puissance de chauffage «Fuste, du 19/10 au 25/1»

Les clichés pris par la caméra infra-rouge montrent la progression de la température surfacique au niveau de la fuste. Les rondins inférieurs affichent les plus faibles températures (Figure C-9). L'air chaud étant moins dense et léger monte, causant l'échauffement des rondins supérieurs. Les bosses des rondins du fait plus exposées, sont plus froides que les creux protégés et isolés par la laine de mouton. Comme c'est le cas des constructions en bois, la fuste ne présente pas de ponts thermiques importants.

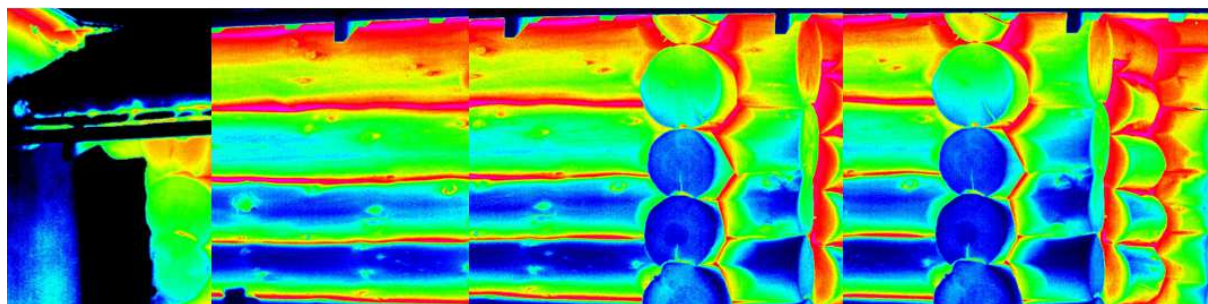


Figure C-9 : Cliché de la température surfacique extérieure au niveau des rondins de la fuste, prise par la caméra infra-rouge, le 10/11/2014 à 17h50.

3. Température dans la paroi

Lors d'une séquence quotidienne, la profondeur de pénétration de la chaleur dans un matériau en bois a été estimée autour 6,5 cm. Cette épaisseur active représente la distance à laquelle la variation de la température est environ un tiers de la variation du climat intérieur pendant la journée [Hameury, Lundström, 2004]. Si on le considère pour la fuste en été, pour 6,5 cm d'épaisseur active, la chaleur est transférée de 1,2°C chaque 1cm puis se stabilise. 7,8 °C d'amortissement de l'onde thermique fait environ le un tiers de 25 °C de température intérieure et peut confirmer l'épaisseur de cette couche active. Cette constatation a été vérifiée par un calcul du transfert thermique en régime dynamique sous Excel. Le tableau C-1 ci-dessous donne les paramètres d'entrée dans le modèle. La figure C-10 montre les profils de la température dans la paroi de rondins à différentes heures du jour, estimés pour le 22 juillet.

Tableau C-2 : Paramètres d'entrée du modèle de transfert thermique

| Données matériau : Bois de douglas | | Température (°C) | | Paramètres de discrétisation | |
|---|----------|-----------------------|------|---------------------------------|--------|
| λ (W/(mK)) | 0,15 | $T_{i \text{ moy}}$ | 25 | $pas \Delta x$ (m) | 0,04 |
| ρ (kg/m ³) | 520 | $T_{e \text{ min}}$ | 17,2 | $pas \Delta t$ (s) | 60 |
| C (J/(kg.K)) | 1600 | $T_{e \text{ max}}$ | 32,7 | m | 147,91 |
| $Albedo$ | 0,48 | Heure max (HH:MM) | | 15 :45 | |
| a | 1,80E-07 | azimut paroi (°) | | 00 | |
| $R_{s \text{ int}} = 1 / h_i$ (m ² K/W) | 0,13 | Inclinaison paroi (°) | | 90 | |
| $R_{s \text{ ext}} = 1 / h_e$ (m ² K/W) | 0,04 | Latitude | | 45°24' | |

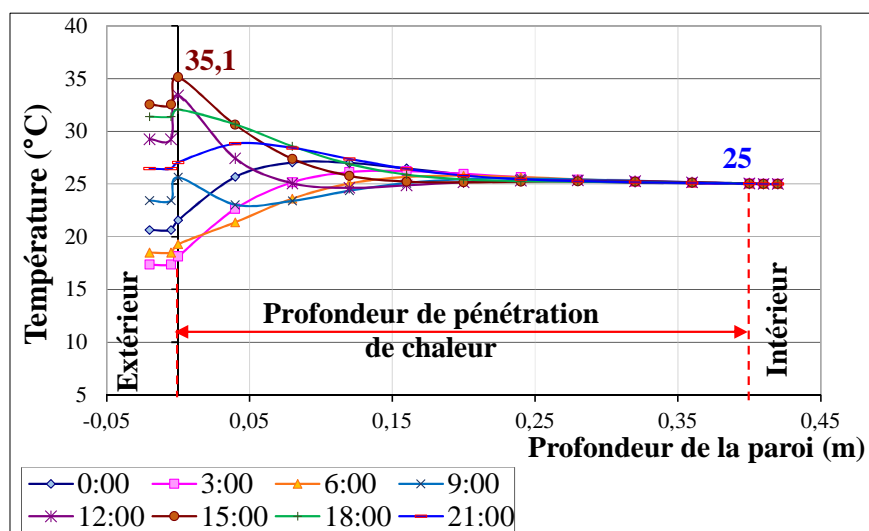


Figure C-10 : Profils de la température dans la paroi du rondin à différentes heures de la journée « fuste, le 22 juillet »

Selon notre modèle, toute l'épaisseur de la paroi est concernée par le transfert de chaleur, certes les premiers centimètres sont les plus actifs.

4. Humidité de l'air et en cavité

En hydrique, la fuste fournit de plus une humidité relative très stable (60 à 62,7%HR) et dans les limites du confort thermique [ASHRAE, 2010] (Figure C-11, 12). Comme ça a déjà été évoqué, le bois en saison d'été est capable de réduire le taux d'humidité et l'enthalpie intérieure [Zhang et al, 2012], [Li et al, 2012]. C'est un matériau hygroscopique, ayant l'aptitude de pomper, stocker et libérer l'humidité de l'environnement. Par ailleurs, lors des fluctuations journalières, la profondeur de pénétration de l'humidité dans le matériau bois a été estimée autour de 3 mm [Simonson et al, 2001]. Dans le cas de la fuste, si l'humidité a été amorti de 40 %HR, seuls les 3 mm de 40 cm de diamètre du rondin qui sont responsables. En outre, avec de faibles taux de ventilation (absence totale dans notre cas), l'effet tampon hydrique de la paroi en bois massif a été jugé appréciable. Son efficacité est bien améliorée avec suffisamment de grandes surfaces de bois, directement exposées au climat intérieur et à grande charge d'humidité [Hameury, 2005].

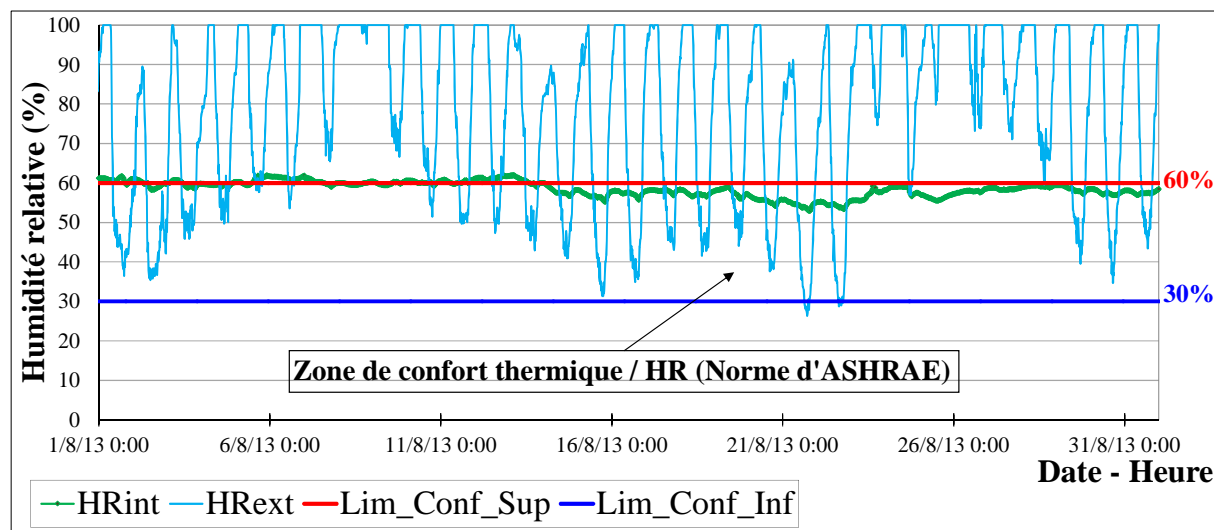


Figure C-11 : Humidités relatives et limites du confort thermique /HR « fuste, mois d'août »

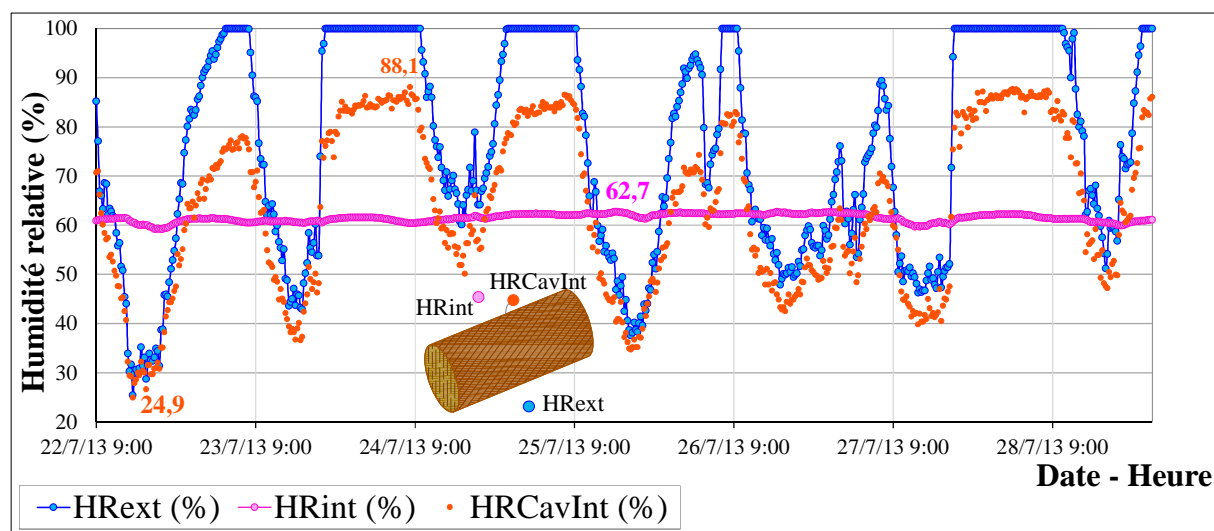


Figure C-12 : Variation de l'humidité relative de l'air et en cavité « fuste, semaine d'été »

En hiver et sans chauffage, l'humidité relative ambiante est pareillement plus constante que celle d'extérieur (Figure C-13), mais plus élevée (de 70 à 73,2 %HR) de celle d'été. Même en toutes saisons, l'effet du tampon d'humidité a été démontré qu'il peut considérablement réduire l'amplitude des fluctuations de l'humidité relative [Jun Moon et al, 2014] et réduire les besoins en chauffage en périodes d'occupation [Simonson et al, 2002]. Cependant, l'humidité capturée dans le matériau contribue ainsi à augmenter la capacité de stockage de chaleur de base du bois sec [Hameurey, 2005]. A chaque élévation de l'humidité relative intérieure un pic de la température ambiante est enregistré et vice versa (Figure C-14). Néanmoins ces fluctuations de température sont ponctuelles, provoquées en séquences journalières et ne peuvent rien rajouter au stockage de chaleur du bois à long terme.

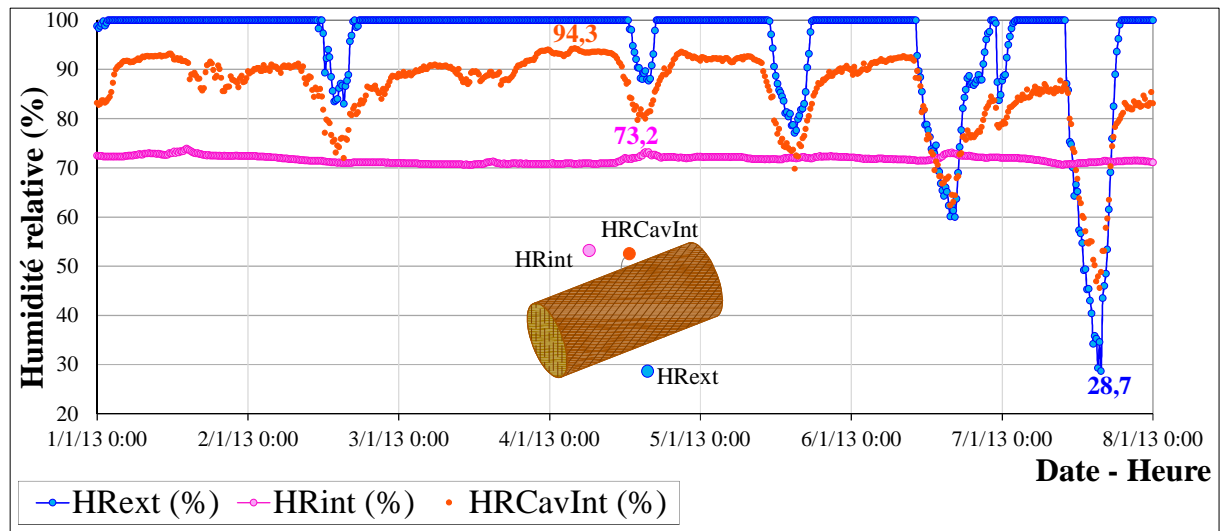


Figure C-13 : Variation de l'humidité relative de l'air et en cavité « fuste, semaine d'hiver »

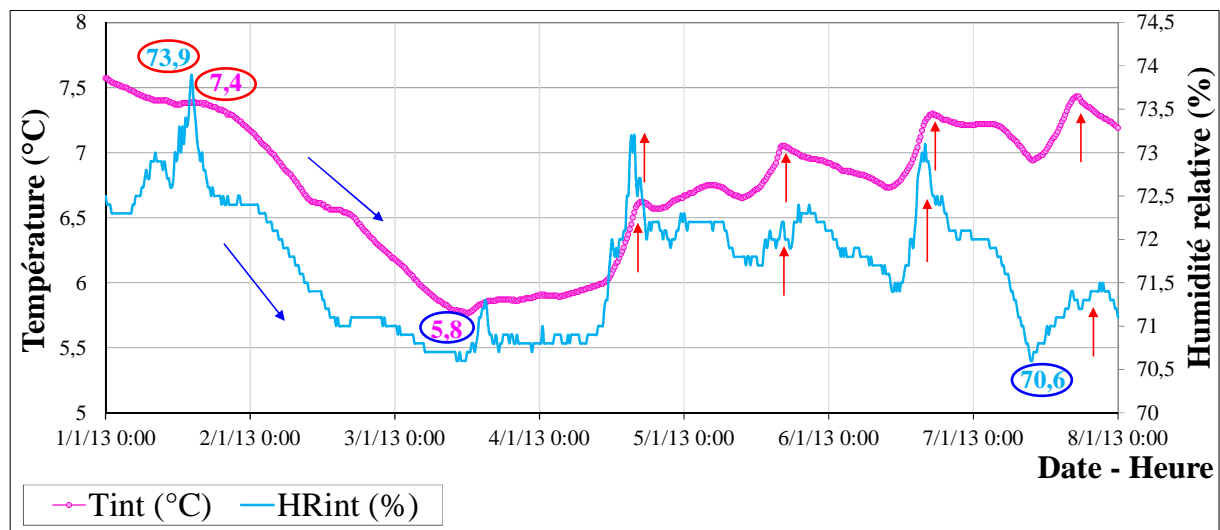


Figure C-14 : Température et humidité relative intérieures « fuste, semaine d'été »

5. Teneur en humidité du bois

La teneur en humidité du bois près de la face interne des rondins (WBois SInt) est quasi stable. En revanche celle près de la face externe (WBois SExt) subit d'importantes variations journalières. A cause du rayonnement solaire, l'amplitude de ces variations est plus importante en été (Figure C-15) qu'en hiver (Figure C-16). Rappelant que la teneur en eau du bois des deux faces a été estimée à partir de la conductivité électrique. Or la zone équipée des sondes de mesure n'a pas été protégée du rayonnement solaire direct. Les prélèvements des sondes sont toutefois à présenter avec précaution.

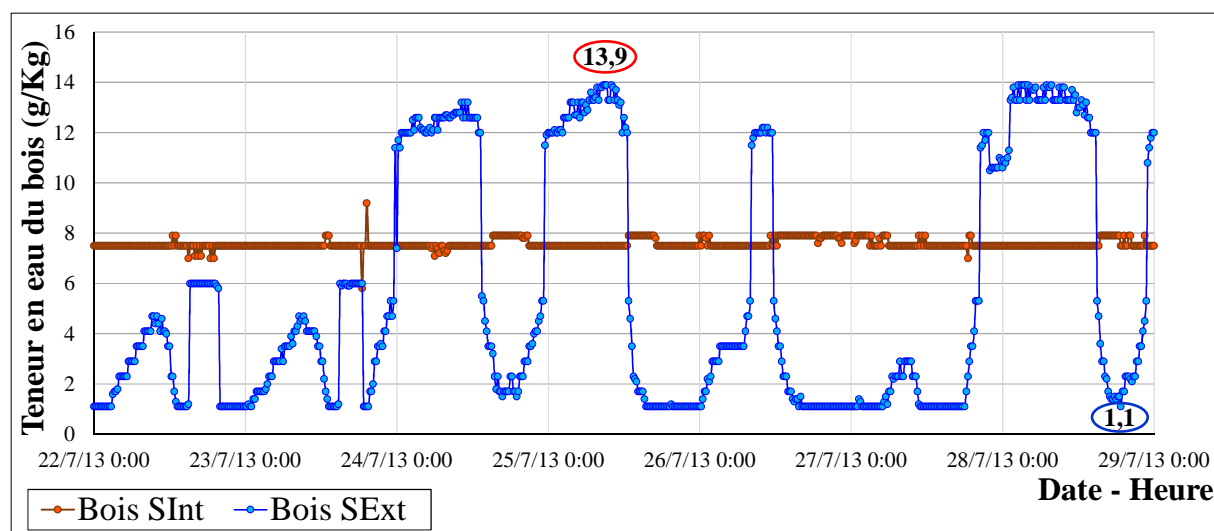


Figure C-15 : Variation des teneurs en eau du bois des rondins « fuste, semaine d'été »

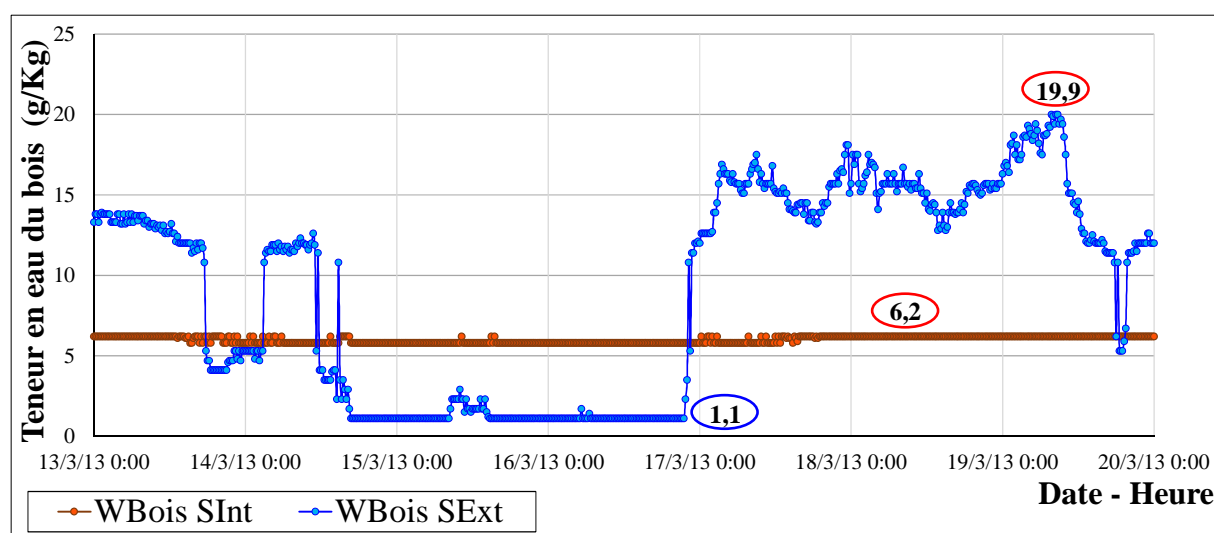


Figure C-16 : Variation des teneurs en eau du bois des rondins « fuste, semaine d'hiver »

L'étude de la fuste constitue une première étape vers la caractérisation hygrothermique des constructions en rondins. Suivant des idées théoriques et expérimentales, le sujet de stockage de chaleur et d'humidité dans la construction en bois massif a été exposé. Ce matériau isolant, structural et naturel, demeure un choix sensé d'une technique traditionnelle de construction qui allie la beauté, l'authenticité, solidité et sécurité. Une grande ambiguïté demeure encore sur son efficacité énergétique [Raji, 2006], [Pickett, 2003] et sur sa conformité avec les exigences réglementaires. La RT2015 prévoit encore une consommation d'énergie primaire de 30 kWh/m²/an maximum, dont la construction en rondins est encore loin d'assurer. Bien qu'il ait été démontré par rapport au climat d'Eggletons, qu'elle assure le confort hygrothermique estival et réduit l'amplitude des fluctuations de l'humidité relative l'hiver comme l'été.